**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS - IFSC
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS - IQSC**

**Detecção por Raios-X de Trincas de
Fadiga em Juntas Rebitadas de Glare®**

Henrique Nogueira Soares

*Dissertação apresentada à Área de Interunidades
em Ciência e Engenharia de Materiais, da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais*

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Tarpani

São Carlos

2007

Soares, Henrique Nogueira

“Detecção por Raios-X de Trincas de Fadiga em Juntas Rebitadas de Glare®”
Henrique Nogueira Soares – São Carlos, 2007

Dissertação (Mestrado) – Interunidades, Física, Química e Ciência e Engenharia de
Materiais da Universidade de São Paulo, 2007 – páginas: 141

Área: Interunidades: Física, Química e Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Tarpani

1.Fadiga; 2.Raios-X; 3.Glare®

1. Detecção por Raios-X de Trincas de Fadiga em Juntas Rebitadas de Glare® .

Universidade de São Paulo

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 - 13560-970 - São Carlos - SP - Fone (16) 3373-9589 Fax (16) 3373-9777

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE HENRIQUE NOGUEIRA SOARES APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DO INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 27/04/2007.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof(a). Dr(a). José Ricardo Tarpani (Orientador e Presidente) - EESC/USP

Prof(a). Dr(a). Dirceu Spinelli - EESC/USP

Prof(a). Dr(a). Luiz Edno Pereira - EMBRAER

*Dedico esta dissertação à minha
saúdosa mãe, Eliza Soares
Nogueira, a quem o Senhor
Jesus já chamou à eterna glória.
Ela me ensinou a andar com
Deus. Ela enfrentou terríveis
tempestades, mas manteve o
olhar fito em Jesus e triunfou!*

AGRADECIMENTOS (1)

- Ao Prof. Dr. José Ricardo Tarpani, pela incansável e competente orientação e também pelo apoio, amizade e confiança, sem o que este trabalho não teria sido realizado.
- Ao Prof. Dr. Waldek Bose Filho, pela confiança e discernimento.
- Aos Eng^{os} Roberto Piovato, Omar Maluf, Maria Cristina, Maurício Angeloni, Danilo Borges e César Augusto Rodriguez pelas informações e discussões que foram de grande valia para o projeto.
- Aos técnicos do Departamento, pelo incentivo na busca do conhecimento.
- Às Repúblicas Rodox e Pós-Rodox, pelo acolhimento e amizade durante esta caminhada.
- Ao meu pai, pelo incentivo pleno e apoio incansável, à minha mãe pela confiança e à minha irmã pela amizade e cumplicidade.
- Aos amigos Gabriel Sales, Thiago de Paula Alonso, Wander Augusto, César Sayão, Lucas Roriviego, Marcio Ishii, Ricardo Hernandes, um muito obrigado pela amizade.

•A VIDA, pela lição que ela me deu, que imediatamente foi transformada em evolução pessoal individual e profissional, onde, segundo especialistas renomados no Brasil e no mundo de varias áreas de conhecimento e pessoas idosas com grande carga de sabedoria de vida, sem está LIÇÃO, o término deste trabalho ainda hoje seria um utopia.

Infinitas Possibilidades!!!!

AGRADECIMENTOS (2)

- Ao NEMAF (Núcleo de Engenharia de Materiais e Análise de Falhas) do SMM-EESC-USP pela disponibilização do sistema universal de ensaios mecânicos MTS-810 para a realização dos ensaios de fadiga.
- À Aviation Equipment Ltd. (CA-EUA) pela doação das chapas do laminado metal-fibra Glare-5.
- À Embraer S/A de S.J. dos Campos pela confecção dos espécimes rebitados.
- À Compoende Aeronáutica Ltda de Tremembé-SP, na pessoa do Eng^o. Nelson do Val Lacerda, pelos ensaios de radiografia convencional.
- Ao Grupo de Ensaios Não-Destrutivos da Universidade Federal de Pernambuco, na pessoa do Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara, pelos ensaios de radiografia digital industrial.
- À empresa que supriu os resultados de radiografia digital com equipamento comercial adaptado (odontológico Gendex[®]), a qual optou por não se identificar, ficando aqui assegurado seu anonimato.
- Ao Eng^o. Romeu Ricardo da Silva, da Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ (Coppe), pelas frutíferas discussões e ensinamentos acerca da radiografia digital.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	xi
RESUMO E PALAVRAS-CHAVE.....	xii
ABSTRACT E KEYWORDS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Motivação.....	01
1.2 Objetivos.....	03
1.3 Conteúdo e organização do trabalho.....	03
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	06
2.1 Laminado híbrido Glare.....	06
2.2 Falha por fadiga em juntas rebitadas de Glare.....	13
2.3 Radiografia por raios-X.....	23
2.3.1 Introdução.....	23
2.3.2 Bases da radiografia convencional por raios-X.....	24
2.3.3 Bases da radiografia digital por raios-X.....	30
2.3.4 Inspeção radiográfica em campo.....	42
3. MATERIAL E CORPOS DE PROVA.....	44
3.1 Material.....	44
3.2 Corpos de prova rebitados.....	51
4. EXPERIMENTAL.....	57
4.1 Fadiga de amplitude constante de tensão.....	57
4.2 Inspeção por raios-X.....	58
4.2.1 Empresa Compoende.....	59
4.2.2 Empresa X.....	60
4.2.3 Universidade Federal de Pernambuco.....	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.1 Fadiga de amplitude constante de tensão.....	66
5.2 Inspeção por raios-X.....	73
5.2.1 Empresa Compoende.....	73
5.2.2 Empresa X.....	76
5.2.3 Universidade Federal de Pernambuco.....	78

6. CONCLUSÕES.....	86
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	88
8. PUBLICAÇÕES DERIVADAS DA DISSERTAÇÃO.....	90
9. BIBLIOGRAFIA.....	91
ANEXO 1.....	97
ANEXO 2.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Características das diversas variações dos laminados híbridos Arall e Glare (^a KUIJPERS P.L, 2003).....	10
Tabela 2.2 Propriedades mecânicas de tração à temperatura ambiente das diversas versões dos laminados híbridos Arall e Glare (^a KUIJPERS P.L, 2003).....	11
Tabela 2.3 Ganhos parciais e global de peso devidos ao uso de laminados híbridos em substituição às ligas-Al monolíticas tradicionais concorrentes (^a KUIJPERS P.L, 2003).....	12
Tabela 2.4 Diferenças básicas entre radiografia nas modalidades convencional e digital em tempo próximo (^{a,b} JOSE et al, 2003).....	39
Tabela 3.1 Resultados dos ensaios de tração monotônica axial de Glare e da liga 2024-T3 (média de três ensaios para cada condição avaliada, em corpos de prova lisos sem concentradores de tensão).....	49
Tabela 5.1 Dados de ensaio das quatro (4) principais juntas rebitadas ensaiadas em fadiga sob amplitude constante de tensão.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Acidente ocorrido em pleno vôo, como resultado do fenômeno de danos em múltiplos sítios associado à não adequação do programa de inspeção periódica não- destrutiva da aeronave ao seu trajeto mais curto que aquele adotado como padrão (http://www.aloha.net/~icarus/).....	02
Figura 2.1 Natureza híbrida metal-fibra do laminado Glare, onde os seus constituintes individuais são discriminados.....	06
Figura 2.2 Uso de Glare (em azul) na fuselagem do superjumbo Airbus A380 (Bastian, F. L., 2003).....	07
Figura 2.3 (a) Conceito de ancoragem de trinca, extensivamente explorado nos laminados híbridos metal-fibra; (b) Ancoragem de trinca em experimento de fadiga com Glare no SMM-EESC-USP; (c) Comparação de taxas de crescimento de trinca entre uma liga monolítica de alumínio 2024-T3 e duas variantes do LMF Glare (ensaios realizados sob uma tensão nominal máxima de 120 MPa, R=0,05 e frequência de 10 Hz) (^a TARPANI J.R,2006).....	08
Figura 2.4 (a) Ciclo de construção de fuselagem de aeronave com Glare, e (b) Produto final, pronto e acabado.....	13
Figura 2.5 Curvas S-N das juntas de Glare com rebites verticais, ou alinhadas (vermelho), e horizontais, ou não-alinhadas (azul) (^a TARPANI et al, 2006).....	14
Figura 2.6 Corpos de prova de Glare: (a) Rebites alinhados (verticais), (b) Não-alinhados(horizontais) à direção do carregamento em fadiga axial (^a TARPANI et al, 2006).....	15
Figura 2.7 (a) Face interna das chapas de Glare pertencentes ao corpo de prova com rebites alinhados fadigado sob tensão máxima de 77 MPa (altas tensões), que falhou catastróficamente após $3,87 \times 10^4$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da cabeça cônica do primeiro rebite a romper durante o mecanismo de fadiga. Observe a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^b TARPANI J.R.;2006).....	16
Figura 2.8 (a) Face interna das chapas de Glare pertencente ao corpo de prova com rebites alinhados fadigado sob tensão máxima de 56 MPa (medias tensões), que falhou catastróficamente após $6,41 \times 10^5$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da cabeça cônica de um dos rebites, em que se observam duas trincas longas partindo da respectiva furação, com	

marcas evidentes de oxidação (fretting) nas suas proximidades. Note a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006)..... 17

Figura 2.9 (a) Face interna das chapas de Glare pertencente ao corpo de prova com rebites não-alinhados fadigado sob tensão máxima de 70 MPa (medias tensões), que falhou catastroficamente após $6,85 \times 10^4$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da cabeça cônica de um dos rebites, em que se observam duas trincas curtas partindo da respectiva furação. Observe a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006)..... 18

Figura 2.10 (a) Face interna das chapas de Glare pertencente ao corpo de prova com rebites não-alinhados fadigado sob tensão máxima de 56 MPa (medias tensões), que falhou catastroficamente após $3,15 \times 10^5$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da furação de um dos rebites, em que se observam marcas de oxidação (fretting) a partir das quais partem as trincas de fadiga. Note a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006)..... 19

Figura 2.11 (a,b) Vistas geral e detalhada de sítios de nucleação de trincas de fadiga por fretting; (c,d) Vistas geral e detalhada de descontinuidades originadas por desgaste superficial tipicamente desenvolvido segundo o mecanismo de fretting (^bTARPANI,J.R., 2006) 20

Figura 2.12 (a,b) Vistas geral e detalhada da borda de furação de rebite mostrando extensivo trincamento; (c) Vista de topo da superfície de fratura indicando a presença de micro-trincamento múltiplo a partir da borda de furação(^bTARPANI J.R.;2006)..... 21

Figura 2.13 Distintos padrões locais de estriamento gerado por fadiga nas lâminas metálicas de Glare (a direção macroscópica de crescimento de trinca é a horizontal)..... 21

Figura 2.14 Elementos essenciais de um tubo de raios-X..... 25

Figura 2.15 Exemplos de fontes móveis industriais de raios-X..... 26

Figura 2.16 Fontes de Irídio-92, Selênio-75 e Cobalto-60 (radiosótopos)..... 26

Figura 2.17 Princípios básicos da radiografia convencional por filmes (BRAY, D.E., 2000).....	27
Figura 2.18 Efeito da orientação do defeito avaliado, com relação ao feixe de radiação incidente, na capacidade de detecção da descontinuidade e na qualidade das imagens obtidas por radiografia convencional (ASKELAND, 1994).....	28
Figura 2.19 (a) Tanque com produtos químicos utilizado no processo de fixação de imagem em filme ou película radiográfica após sensibilização por radiação; (b) Revelação das imagens em câmara escura; (c) Análise do negativo (com negatoscópio) em busca de defeitos no objeto radiografado.....	29
Figura 2.20 Pannel plano de Si para radiografia digital direta.....	32
Figura 2.21 (a) Sistema industrial completo de radiografia digital pelo método indireto; (b) Placa de captura de imagens; (c,d) Duas possibilidades de leitura das placas sensibilizadas por radiação; (e) Exibição de resultados da inspeção por raios-X na tela de computadores (http://www.geinspectiontechnologies.com/index.html).....	34
Figura 2.22 Sistema de leitura por laser de telas de fósforo para uso odontológico.....	35
Figura 2.23 Ciclo completo de obtenção de imagens radiográficas pelo método digital indireto após a sensibilização da placa de imagens por raios-X ou γ , cuja duração frequentemente não supera os 3 minutos (http://www.arctest.com.br).....	36
Figura 2.24 (a) Imagem de raios-X de uma junta fadigada de Glare (cerca de 200.000 ciclos de tensão trativa flutuante aplicados), idêntica à utilizada no reparo da fuselagem de uma aeronave de teste conforme, mostrado em (b). ^{a,b} KUIJPERS et al (2002).....	43
Figura 3.1 Duas maneiras de descrever a arquitetura do LMF Glare classificação 5: arranjo simétrico 2/(0/90) _s	45
Figura 3.2 Placas de Glare-5 fabricadas pela firma Comtek (CAN) e doadas pela empresa Aviation Equipments (CA-USA).....	46
Figura 3.3 Duas ampliações das microestruturas (a) da liga de alumínio 2024-T3, e (b) das fibras fortalecedoras de vidro S2. A direção longitudinal (0°), referente à de laminação do Al-2024, corresponde à largura da página. Ataque químico Keller.....	46
Figura 3.4 Curvas de tração monotônica axial quase-estática do Glare-5 e da liga-Al 2024-T3 concorrente (^b TARPANI et al, 2006).....	47
Figura 3.5 Projeto dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração axial quase-estática do Glare e da liga Al-2024-T3.....	48

Figura 3.6 Microestrutura típica da liga Al-2024-T3: (a) Sem ataque; ((b) Ataque com reagente de Keller.....	48
Figura 3.7 Projeto dos corpos de prova entalhados utilizados nos ensaios de tração axial quase-estática de Glare e da liga Al-2024-T3.....	50
Figura 3.8 Croqui (a) e foto (b) de um corpo de prova Glare-Glare com 2 rebites horizontais, ou não-alinhados em relação à direção de carregamento em fadiga. Observe a colagem de end tabs nas extremidades do espécime de modo a garantir a sua simetria longitudinal (para um carregamento essencialmente em tração), um maior poder de agarramento e uma resistência mínima à compressão exercida pelas garras hidráulicas do sistema de ensaio.....	52
Figura 3.9 (a) Esquema com a terminologia empregada para as duas (2) chapas e quatro (4) lâminas metálicas que constituem uma junta rebitada simples sobreposta Gl-Gl. As lâminas de liga-Al numeradas 2 e 3 são aqui denominadas internas (à junta), e operam em íntimo contato durante o carregamento em fadiga, experimentando um movimento relativo repetido de baixa amplitude, que dá origem ao fenômeno de fretting. As lâminas 2 e 3 correspondem às chamadas faying surfaces. Já as lâminas numeradas 1 e 4 são denominadas externas (à junta); (b) Vista em corte da seção transversal de uma junta mostrando a cabeça cônica do rebite ajustada ao furo escareado; (d) Detalhe do rebite.....	54
Figura 3.10 (a) Seção longitudinal do rebite de liga de alumínio de alta resistência classificação MS20426 AD 4-7; (b) Detalhe do perfil cônico do encaixe da cabeça do rebite na chapa escareada de Glare; (c) Detalhe do perfil reto de encaixe do rabo do rebite na chapa não-escareada de Glare.....	55
Figura 3.11 (a) Corte da seção rebitada identificando-se todos os componentes da junta sobreposta; (b) Detalhe do perfil cônico do furo escareado numa das chapas de Glare.....	56
Figura 4.1 (a) Sistema universal completo de ensaios mecânicos MTS-810; (b) Detalhe da estrutura de carregamento,(c) Corpo de prova rebitado durante ensaio de fadiga.....	58
Figura 4.2 (a) Scanner DenOptix QST da Gendex utilizado para radiografia digital pela empresa X. (http://www.gendex-dental.com/); (b) Equipamento completo; (c) Placa de imagem sensibilizada por radiação sendo carregada para leitura por feixe de laser.....	61

Figura 4.3 Tipos de imagens obtidas por raios-X digital de juntas rebitadas após reedição em programas tipo Adobe® e Coreldraw®: (a) Padrão, (b) Tons invertidos correspondentes, (c) Em alto relevo ou tri-dimensional (3-D), (d) Tons invertidos correspondente.....	62
Figura 4.4 (a) Experimento de radiografia digital em pleno andamento na UFPE; (b) Sistema computadorizado de leitura óptica-fotônica das placas sensibilizadas de compostos de fósforo (http://las.perkinelmer.com/search/Search.htm?Ntt=cyclone).....	64
Figura 4.5 Procedimento de rotação dos espécimes rebitados tal como adotado nas inspeções radiográficas conduzidas na UFPE.....	65
Figura 5.1 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD19 após a aplicação de 2.297.900 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,0 kN.....	68
Figura 5.2 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD29 após a aplicação de 7.724.352 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,0 kN.....	69
Figura 5.3 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD111 após a aplicação de 1.169.000 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,5 kN.....	70
Figura 5.4 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD211 após a aplicação de 1.929.990 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,5 kN.....	71
Figura 5.5 Exemplos de trincas de fadiga desenvolvidas nas lâminas metálicas internas de chapas rebitadas de Glare, desenvolvidas sob baixas tensões aplicadas (FERNANDES et al, 2004). Note que a fratura da cabeça dos rebites é subsequente à evolução do trincamento por longas extensões.....	72
Figura 5.6 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para 4 corpos de prova (CDP) previamente fadigados até determinado número N de ciclos: São fornecidas as imagens originais (positivos) e, correspondentemente, em tons invertidos (negativos): (a & a') CDP19, N=2.297.900; (b & b') CPD29, N=7.724.352; (c e c') CPD111, N=1.169.000; (d & d') CPD211, N=1.929.990. As setas apontam para os trincamentos detectados pela técnica em questão.....	73
Figura 5.7. Padrão de trincamento duplo das lâminas metálicas (<i>faying surfaces</i>) das chapas de Glare rebitadas segundo o arranjo vertical, ou alinhado, medias tensões de carregamento. Note que a medias tensões, indica o que provavelmente ocorra no estágio III, numa taxa mais lenta de progressão dos danos. Setas vermelhas apontam para os 4 (i.e., dois pares) sítios de nucleação.....	74
Figura 5.8. (a) Padrão de trincamento quádruplo das lâminas metálicas (<i>faying surfaces</i>) das chapas de Glare rebitadas segundo o arranjo horizontal, ou não-alinhado, no regime de medias tensões de carregamento. Repare que à medias tensões aplicadas, indica que provavelmente ocorra no estágio III, numa taxa mais lenta de progressão dos danos. Setas vermelhas apontam para os 8 (i.e., quatro pares) sítios de nucleação; (b,c) Vista detalhada de um típico trincamento duplo emanando de um único furo de rebite em uma lamina metálica (<i>faying surface</i>) de Glare.....	75

Figura 5.9 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP19, N=2.297.900: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.....	77
Figura 5.10 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP29, N=7.724.352: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.....	77
Figura 5.11 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP111, N=1.169.000: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.....	78
Figura 5.12 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP211, N=1.929.990: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.....	78
Figura 5.13 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP19, N=2.297.900: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°.....	82
Figura 5.14 Imagens radiográficas (equipamento industrial) obtidas para o CDP29, N=7.724.352: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°.....	83
Figura 5.15 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP111, N=1.169.000: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a	

+45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°;	
(h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°.....	84
Figura 5.16 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP211, N=1.929.990: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°.....	85
Figura A1.1 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP15 rompido após 72.500 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 5 kN e R=0,1: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.....	98
Figura A1.2 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP24 rompido após 1.010.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4 kN e R=0,1: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.....	99
Figura A1.3 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP26 rompido após 145.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 5 kN e R=0,1: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas. Note que a qualidade das radiografias é bem inferior aos casos A1.1 e A1.2, sinalizando o efeito (negativo) da incidência do feixe de radiação na face trincada do laminado Glare. Este aspecto não é aprofundado no presente trabalho.....	100
Figura A1.4 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP212 rompido após 275.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4,5 kN e R=0,1: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.....	101
Figura A1.5 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP17 rompido após 329.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4 kN e R=0,1: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.....	102
Figura A1.6 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP24 rompido após 1.010.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4 kN e R=0,1: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas. Note que o sentido de entrada do feixe é inverso ao realizado na obtenção das imagens fornecidas na Figura A1.2. Novamente, a qualidade das radiografias parece ser positivamente afetada quando o feixe de radiação incide na face não-trincada do	

laminado Glare. Este aspecto não é aprofundado no presente trabalho..... 103

Figura A1.7 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP212 rompido após 275.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4,5 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas. Compare esta figura com a Fig.A1.4, e repare na melhor qualidade daquela sobre esta..... 104

Figura A2.1 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para 4 corpos de prova (CDP) previamente fadigados até determinado número N de ciclos: São fornecidas as imagens originais(a-d) e, correspondentemente, em tons invertidos (a'-d'): (a,a') CDP 19, $N=2.297.900$; (b,b') CPD 29, $N=7.724.352$; (c,c') CPD 111, $N=1.169.000$; (d,d') CPD 211, $N=1.929.990$. As setas azuis apontam para riscamento da amostra..... 107

Figura A2.2 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP19, $N=2.297.900$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D..... 108

Figura A2.3 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP29, $N=7.724.352$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D..... 109

Figura A2.4 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP111, $N=1.169.000$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D..... 110

Figura A2.5 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP211, $N=1.929.990$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D..... 111

Figura A2.6 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP19, $N=2.297.900$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° 113

Figura A2.7 Imagens radiográficas (equipamento industrial) obtidas para o CDP29, N=7.724.352: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°..... 115

Figura A2.8 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP111, N=1.169.000: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°..... 117

Figura A2.9 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP211, N=1.929.990: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°..... 119

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

a_R	Alongamento na fratura [%]
CDP	Corpo de prova
e	Deformação [%]
E	Módulo de elasticidade [GPa]
E_C	Módulo de elasticidade em compressão [GPa]
E_T	Módulo de elasticidade em tração [GPa]
END	Ensaio não-destrutivo
Hz	Frequência de aplicação do carregamento [s^{-1}]
IP	Imaging plate
K_t	Fator K de concentração de tensões (adimens.)
L	Direção axial ou longitudinal (laminação)
L_O	Abertura inicial do extensômetro [mm]
LMF	Laminado metal-fibra
LT	Direção diagonal entre eixos longitudinal e transversal
m	Número de camadas da liga de alumínio
MTS	Materials Testing System
n	Número de camadas de pré-impregnado resina/fibra
N	Número de ciclos de (vida em) fadiga
R	Razão de tensão (carga mínima /máxima)
RC	Radiografia computadorizada (digital)
S	Tensão (MPa)
V_p	Volt pico [KV]
$\sigma_{LE(C)}$	Limite de escoamento em compressão [MPa]
$\sigma_{LE(T)}$	Limite de escoamento em tração [MPa]
σ_R	Limite de resistência à tração [MPa]
3-D	Tridimensional

DETECÇÃO POR RAIOS-X DE TRINCAS DE FADIGA EM JUNTAS REBITADAS DE GLARE®

Resumo: Foi realizado um estudo comparativo da capacidade de duas variantes do método de radiografia por raios-X em detectar trincas de fadiga em juntas sobrepostas rebitadas de laminado híbrido metal-fibra Glare® de uso aeronáutico. Durante os ensaios mecânicos de fadiga sob amplitude constante de tensão, diversos corpos de prova rebitados foram periodicamente inspecionados por raios-X, em ambas as modalidades convencional e digital. Raios-X em filmes convencionais proporcionaram ótimo detalhamento de trincas nas juntas mecânicas, enquanto que as imagens geradas pela modalidade digital apresentaram qualidade muito inferior, prejudicando ou até mesmo impedindo a avaliação do grau de integridade estrutural das juntas rebitadas.

Palavras-chave: Fadiga, junta rebitada, laminado metal-fibra, material aeronáutico, radiografia de raios-X.

X-RAY INSPECTION OF FATIGUE CRACKS IN RIVETED LAP JOINTS OF GLARE[™]

Abstract: A comparison is performed on the ability of two modalities of nondestructive X-ray radiography method in detecting fatigue cracks in riveted lap joints of aeronautical grade fiber-metal laminate Glare[™]. During constant amplitude loading in fatigue testing riveted specimens were periodically inspected using both the conventional and digital X-ray methodology. Conventional film X-ray modality provided high quality images of growing cracks in the mechanical joints, whereas digital radiography generated faulty images, which impaired or even prevented the structural integrity assessment of the riveted joints.

Keywords: Airframe material, fatigue, fiber-metal laminate, X-ray radiography, riveted lap joint.

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO

1

1.1 Motivação

O setor aeronáutico se consolidou nas últimas décadas como o meio de transporte mais rápido e eficiente. Neste sentido, o desenvolvimento de novos materiais, mais leves e resistentes, em termos mecânicos e químicos (e.g. corrosão), tem contribuído significativamente para o crescimento e aperfeiçoamento desta área da mobilidade. Isto inclui o aumento da vida útil, bem como da qualidade e o melhor desempenho das estruturas e componentes aeronáuticos, o que se reflete diretamente na redução dos custos operacionais, em particular os de manutenção, mais especificamente os de inspeção periódica não-destrutiva e de análise e prevenção de falhas. Em virtude do seu extraordinário potencial de aplicação, o laminado híbrido metal-fibra Glare[®] vem sendo utilizado na confecção da fuselagem, bordos de ataque, soalhos, divisórias, dentre outros, de aeronaves comerciais (e.g. Airbus A380), substituindo assim ligas tradicionais de alumínio de grau aeronáutico, especialmente a 2024-T3 (BASTIAN F.L.;2003). No entanto, em vista da complexidade macro- e microestrutural desta classe de materiais tipo sanduíche, muitas incertezas ainda existem com relação à capacidade dos métodos de ensaios não-destrutivos tradicionalmente aplicados aos materiais metálicos ditos monolíticos em identificar clara e inequivocamente os danos gerados por carregamentos mecânicos tipicamente desenvolvidos em uma estrutura aeronáutica, destacando-se impacto e fadiga. No caso específico de fadiga, as dificuldades na identificação de trincas nos laminados híbridos são ainda maiores quando se tratam de juntas rebitadas, haja vista a introdução intencional de descontinuidade geométrica (furação) e o uso de elemento estranho (rebite). O presente trabalho constitui uma pequena tentativa em colaborar para a adequação dos ensaios não-destrutivos na tarefa de inspeção de juntas rebitadas desta classe de materiais estruturais, as quais certamente estarão, num futuro não muito distante,

fazendo parte de aeronaves comerciais nacionais, sem mencionar o fato de que aeronaves estrangeiras, já se utilizando destes materiais, estarão dentro em breve circulando no país e deverão ser inspecionadas por nossas empresas.

De modo a ilustrar os riscos da condução inadequada de inspeções periódicas não-destrutivas durante a etapa de manutenção de aeronaves, a Figura 1.1 mostra o resultado de um acidente ocorrido com uma aeronave Boeing 737, da empresa aérea americana Aloha Airlines, que teve parte de sua fuselagem (confeccionada com a tradicional liga de alumínio 2024-T3) arrancada em pleno vôo no trajeto entre duas ilhas do estado americano do Havaí, de Hilo a Honolulu, no ano de 1988.

Figura 1.1 Acidente ocorrido em pleno vôo, como resultado do fenômeno de danos em múltiplos sítios associado à não adequação do programa de inspeção periódica não- destrutiva da aeronave ao seu trajeto mais curto que aquele adotado como padrão (<http://www.aloha.net/~icarus/>)

Na ocasião, trincas nucleados em múltiplos locais (*multiple site damage*), notadamente a partir furação dos rebites, possibilitaram a criação de uma trinca gigante, originada da junção instantânea e catastrófica das trincas individuais, as quais vinham até então crescendo subcriticamente pela ação periódica e regular dos ciclos de (des)pressurização da cabine da aeronave, ou seja, por fadiga (*widespread fatigue damage*). Foi concluído pelas empresas e entidades envolvidas no letígio, inclusive a

fabricante americana Boeing Co. e a NTSB (*National Transportation Safety Board*), órgão oficial do governo americano que conduz as investigações de acidentes no sistema de transporte dos EUA, que o uso da aeronave em trajetos relativamente curtos acelerou sobremaneira os danos (por unidade de tempo, não de vôos), os quais (danos) eram de certa forma esperados, sem que houvesse, em contrapartida, uma adequação do período de inspeções periódica à esta rota em particular. Foi também considerado o fato de que, na época, não era obrigatória a inspeção visual externa da fuselagem pela tripulação a cada parada da aeronave. Alegações de que o sistema de despressurização segura da aeronave não havia operado a contento também fizeram parte do processo, o que teria, inclusive, causado a morte de uma atendente de vôo (NEWMAN JR.J.C, 2006).

Esse fatídico acidente deu, e ainda tem dado origem a um sem número de pesquisas e publicações científicas sobre o comportamento de trincas múltiplas de fadiga nucleadas e crescidas em estruturas rebitadas aeronáuticas (^{a,b}AHMED et al, 2006; ATRE & JOHNSON, 2006; IYER et al, 2005; JURY & RAMAKRISHNAN, 2006; RAMAKRISHNAN & JURY, 2006; NEWMAN et al, 2006; RAMAKRISHNAN et al, 2006; SILVA et al, 1999; SZOLWINSKI & FARRIS, 1999).

1.2 Objetivos

Objetiva-se neste estudo avaliar a efetividade de duas modalidades da técnica de inspeção não-destrutiva de radiografia por raios-X na detecção e identificação de trincas de fadiga em juntas rebitadas de laminado metal-fibra (LMF) Glare.

1.3 Conteúdo e organização do trabalho

Neste Capítulo 1 foi discutido brevemente o conceito de laminados metal-fibra, enfatizando-se de maneira sucinta as suas vantagens nos quesitos de desempenho mecânico e peso frente aos materiais metálicos, ditos monolíticos, tradicionalmente utilizados em aplicações estruturais na indústria aeronáutica. Constam também deste primeiro capítulo, a relevância do tema defendido, e os objetivos principais deste projeto de pesquisa.

No Capítulo 2 é feita a revisão da literatura sobre os tópicos de laminados híbridos metal-fibra, em que se descrevem suas macro- e microestruturas, destacam-se as suas

propriedades de fadiga, as potenciais aplicações desta classe de laminados estruturais no campo aeronáutico, suas vantagens em termos de redução de peso para a aeronave, bem como se estabelecem os principais mecanismos de falha por fadiga quando o material é utilizado na forma de juntas rebitadas. Ainda no segundo capítulo, é exposto o estado da arte relativamente ao uso dos métodos radiográficos de raios-X na caracterização de defeitos em materiais e estruturas de engenharia, e, particularmente, do desempenho em fadiga de juntas rebitadas do laminado híbrido metal-fibra Glare.

O Capítulo 3 descreve o material ensaiado em termos de seu arranjo estrutural, fases presentes e suas propriedades mecânicas, bem como as principais características dos corpos de prova ensaiados destrutiva e não-destrutivamente durante o projeto.

No Capítulo 4 são estabelecidos os programas experimentais e descritas as condições em que se realizaram os ensaios mecânicos de fadiga e as inspeções não-destrutivas por raios-X dos espécimes fadigados.

No Capítulo 5 realiza-se, tendo-se como base os conceitos e fundamentos previamente estabelecidos no Capítulo 2, a análise dos resultados de ensaios mecânicos e de inspeção não destrutiva dos materiais, quando são apresentados todos os dados experimentalmente obtidos.

Extraem-se as conclusões finais no Capítulo 6.

No Capítulo 7 várias sugestões para futuros estudos complementares, de modo a se responderem diversos questionamentos surgidos durante o andamento do presente trabalho, bem como visando explorar ainda mais e avançar no uso deste importante método não-destrutivo nos materiais e estruturas aeronáuticas.

As publicações até o momento oriundas do projeto em questão são listadas no Capítulo 8. Muitas mais certamente virão.

A bibliografia apresentada no Capítulo 9 versa sobre todo o material efetivamente consultado durante o período de condução da presente dissertação.

Os anexos 1 e 2 fornece informações relevantes, porém não fundamentais para o entendimento do trabalho, quanto ao programa prévio de calibração dos ensaios por raios-X pelos diversos participantes do projeto, bem como reproduzem fotos do corpo principal do texto em escalas mais ampliadas visando dirimir qualquer dúvida quanto aos trincamento revelados, ou não, pelas técnicas radiográficas.

2.1 Laminado híbrido Glare

Glare[®] é um laminado metal-fibra (LMF) composto por camadas de liga de alumínio intercaladas com camadas de tecido de pré-impregnado de fibras resistentes de vidro com resina termorrígida epóxi (Figura 2.1). Este material tem se mostrado um forte candidato à de construção de fuselagens de aeronaves (Figura 2.2) por exibir ótimas propriedades de resistência, em especial à fadiga, aliada a uma baixa densidade, relativamente às ligas de alumínio, além de ótimas resistências ao impacto, à corrosão e à chama (BEUMLER, 2006; VERMEEREN et al, 2003; BASTIAN, 2003; GUNNINK et al, 2002; ROEBROEKS, 2002; VLOT, 2001; ASUNDI & ALTA, 1997).

Figura 2.1 Natureza híbrida metal-fibra do laminado Glare, onde os seus constituintes individuais são discriminados.

Figura 2.2 *Uso de Glare (em azul) na fuselagem do superjumbo Airbus A380 (Bastian, F. L., 2003).*

A alta resistência à propagação de trinca por fadiga exibida pelo Glare é devida ao fenômeno denominado *ancoragem de trinca*, em que as fibras de vidro, mesmo que parcialmente fraturadas e destacadas da matriz epóxi, ainda sustentam considerável parcela do carregamento atuando no componente, e, portanto, reduzem campo de tensão (ou força motriz) atuante na ponta da trinca, que se propaga preferencialmente nas camadas adjacentes de liga de alumínio (Figura 2.3: VLOT, 2001).

O desenvolvimento inicial desta classe de materiais laminados híbridos partiu de uma ação conjunta entre a fábrica de aviões Fokker e a Universidade de Delft na década de 80 (Bastian, F. L., 2003). A primeira geração de materiais compostos laminados metal-fibra, denominados Arall[®] (Aramid **R**einforced **AL**uminum **L**aminates) era baseada em camadas da liga de alumínio 2024-T3 reforçadas com fibra de aramida (poliamida aromática, mais conhecida comercialmente como Kevlar) orientadas unidirecionalmente na direção de máximo esforço mecânico aplicado em serviço (0°). A primeira aplicação prática do Arall ocorreu em alguns revestimentos de asas da aeronave Fokker F-50. Este emprego permitiu uma redução de aproximadamente 20% no peso destes painéis em comparação aos similares confeccionados a partir da liga convencional de alumínio 2024 (BASTIAN, L. F., 2003).

Figura 2.3 (a) Conceito de *ancoragem de trinca*, extensivamente explorado nos laminados híbridos metal-fibra; (b) *Ancoragem de trinca* em experimento de fadiga com Glare no SMM-EESC-USP; (c) Comparação de taxas de crescimento de trinca entre uma liga monolítica de alumínio 2024-T3 e duas variantes do LMF Glare (ensaios realizados sob uma tensão nominal máxima de 120 MPa, $R=0,05$ e frequência de 10 Hz) (^aTARPANI J.R,2006).

No entanto, o uso de fibras de poliamida aromática, ou aramida (Arall) e de carbono (Carall[®] - **Carbon Reinforced ALuminum Laminates**), na segunda geração dos LMF, levou a problemas de tensões residuais trativas, desenvolvidas no ciclo térmico de cura durante o processo de fabricação dos laminados, de sorte que o seu desempenho em serviço dos mesmos era prejudicado em grande extensão(BASTIAN, L. F.,2003).

No início de 1987, surgiu a segunda geração de materiais compostos da classe dos laminados metal-fibra, reforçada desta feita com fibras de vidro de alta resistência que, contrariamente às fibras de aramida e carbono, conduziam às desejáveis tensões residuais levemente compressivas, após a cura e pré-estiramento axial, que auxiliam sobremaneira na resistência global do laminado às cargas trativas (estáticas ou cíclicas) impostas em serviço. Em função do emprego destas fibras (*glass fibers*), esta ultima geração de laminados híbridos recebeu o nome comercial de Glare (**Glass Reinforced**).

Enquanto o Arall possuía somente fibras de aramida unidirecionalmente dispostas (0°) entre as laminas de liga de alumínio 2024-T3, o Glare, por sua vez, apresenta, além de versões com fibras de vidro unidirecionadas (0°) reforçando ligas de alumínio 7475 (Glare-1) e 2024 (Glare-2), também categorias com disposições biaxiais das fibras de vidro nas direções 0° e 90° (Glare-3), com liga Al-2024, e Glare-4, também com liga Al-2024 porém com o dobro da quantidade de fibras orientadas na direção 0° em relação à orientação 90°. O Glare-5, utilizando-se também de liga-Al 2024-T3, é um dos últimos avanços desta classe de materiais, e se notabiliza pela elevada resistência a cargas de impacto, dada à sua distribuição bem balanceada de fibras de vidro, com idênticas quantidades dispostas nas direções 0° e 90°. As características de projeto de todos estes laminados, e as correspondentes propriedades mecânicas em tração à temperatura ambiente são listadas respectivamente nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 Características das diversas variações dos laminados híbridos Arall e Glare (^aKUIJPERS P.L, 2003).

Laminado	Liga de AL	Espessura do metal	Constituintes do pré-impregnado	Orientação do Pré-impregnado	Espessura do Pré-impregnado
ARALL - 2	2024-T3	0,2 – 0,4 mm	Epóxi-Fibra de Aramida	Unidirecional	0,21 mm
ARALL - 3	7475-T76	0,3 – 0,4 mm	Epóxi-Fibra de Aramida	Unidirecional	0,21 mm
GLARE - 1	7475-T76	0,3 – 0,4 mm	Epóxi-Fibra de Vidro	Unidirecional	0,25 mm
GLARE - 2	2024-T3	0,2 – 0,4 mm	Epóxi-Fibra de Vidro	Unidirecional	0,25 mm
GLARE - 3	2024-T3	0,2 – 0,4 mm	Epóxi-Fibra de Vidro	Cruzado	0,25 mm
GLARE - 4	2024-T3	0,2 – 0,4 mm	Epóxi-Fibra de Vidro	Cruzado	0,375 mm
GLARE - 5	2024-T3	0,51 mm	Epóxi-Fibra de Vidro	Cruzado	0,51 mm

Em virtude da arquitetura da construção do Glare, é possível alcançar uma redução de até 30% do peso estrutural de um componente. Considerando-se que as propriedades de Glare são, numa base de espessura de material, muito superiores às das ligas monolíticas concorrentes de alumínio, a redução na espessura das chapas utilizadas em serviço, e a conseqüente redução adicional de peso da estrutura, pode levar a economias de peso, e vantagens associadas, ainda maiores. Tal fato é mostrado na Tabela 2.3, em que são especificadas as reduções parciais de peso da estrutura como decorrência da menor densidade e da menor espessura de chapa requerida, respectivamente, e a economia global de peso proporcionada pela consideração simultânea destes dois fatores.

Tabela 2.2 Propriedades mecânicas de tração à temperatura ambiente das diversas versões dos laminados híbridos Arall e Glare (^aKUIJPERS P.L, 2003).

		GLARE 1		GLARE 2		GLARE 3		GLARE 4		GLARE 5	ARALL 2	ARALL 3	AL 2024 T3
Empilhamento		2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2	3/2	-
σ_R [MPa]	L	1077	1282	992	1214	662	717	843	1027	683	717	821	455
	LT	436	352	331	317	653	716	554	607	681	317	379	448
$\sigma_{LE}(T)$ [MPa]	L	525	545	347	360	315	305	321	352	297	365	607	359
	LT	342	333	244	228	287	283	250	255	275	228	324	324
E_T [GPa]	L	66	65	67	65	60	58	60	57	59	66	68	72
	LT	54	50	55	50	60	58	54	50	59	53	49	72
a_R [%]	L	4,2	4,2	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	2,5	2,2	19
	LT	7,7	7,7	10,8	10,8	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	12,7	8,8	19
$\sigma_{LE}(C)$ [MPa]	L	447	424	390	414	319	309	349	365	283	255	345	303
	LT	427	403	353	236	318	306	299	385	280	234	365	345
E_C [GPa]	L	63	67	69	67	63	60	62	60	61	65	66	74
	LT	56	51	56	52	62	60	57	54	61	53	50	74

Porém, cabe mencionar que o custo do Glare é ainda muito superior ao da chapa de alumínio monolítica concorrente. Como exemplo, 1 m² de Glare-5 foi cotado no mercado internacional, no ano de 2001, em cerca de US\$ 2,000.00. Em contrapartida, o uso de Glare implica, como já mencionado, em significativa economia de peso da aeronave (que por sua vez garante um aumento do custo carga – *pay-load*, a possibilidade de redução da motorização da aeronave, economia de combustível, aumento de autonomia de voo, entre outras benesses), bem como na substancial redução dos custos de manufatura de estruturas e componentes devido à possibilidade de ampla integração de elementos construtivos em uma única etapa de fabricação (Figura 2.4), e, finalmente, na minimização dos gastos de manutenção da aeronave como decorrência de sua elevada resistência ao crescimento de trincas por fadiga.

Tabela 2.3 Ganhos parciais e global de peso devidos ao uso de laminados híbridos em substituição às ligas-Al monolíticas tradicionais concorrentes (^aKUIJPERS P.L, 2003).

Espessuras das chapas de Alumínio (mm)	Configuração do LMF	Espessura do LMF (mm)	Redução de Peso Densidade (%)	Redução de Peso Espessura (%)	Redução Total de Peso (%)
1,02	Glare - 3, 2/1	0,86	10	15	23,5
1,27	Glare - 3, 3/2	1,12	16	12	26,1
1,60	Glare - 5, 2/1	1,52	12	5	16,0
2,03	Glare - 5, 3/2	1,73	9	15	22,6
2,54	Glare - 3, 4/3	1,98	13	22	32,1
3,81	Glare - 3, 6/5	3,10	15	18	30,3
5,08	Glare - 3, 7/6	4,37	15	14	26,9

Figura 2.4 Chamada na próxima página.

(b)

Figura 2.4 (a) Ciclo de construção de fuselagem de aeronave com Glare, e (b) Produto final, pronto e acabado.

2.2 Falha por fadiga em juntas rebitadas de Glare

LAZZERI (2001) foi o primeiro pesquisador a publicar na literatura aberta resultados de experimentos de fadiga em juntas rebitadas de Glare ensaiadas em condições controladas de laboratório. Ele primou por utilizar corpos de prova que reproduzissem o mais fielmente possível as juntas aeronáuticas reais. Embora seus resultados numéricos possam ser considerados valiosos sob o ponto de vista de projeto estrutural, a abordagem adotada pelo pesquisador não permitiu uma análise descritiva mais apurada quanto à (macro)mecânica e os (micro)mecanismos de falha (incluindo fratura) operando no par material / juntas, dada à grande complexidade construtiva destas últimas, e a não menos complexa estrutura do laminado Glare.

Resultados posteriormente obtidos por FERNANDES et al (2004) e ^aTARPANI et al (2006) em juntas rebitadas Glare-Glare, exibindo um arranjo bem mais simples que aquele utilizado por LAZZERI (2001)¹, mostraram que o mecanismo de falha

¹ As juntas ensaiadas por LAZZERI (2001) diferem significativamente daquelas utilizadas por FERNANDES et al (2004) e TARPANI et al (2006), visto que estas últimas foram projetadas

preponderante é basicamente uma função do nível de tensão aplicado, podendo variar desde a fratura por cisalhamento puro dos rebites, sob tensões relativamente altas (regime de altas tensões), ao *fretting* da lâmina interna (*faying surface*) de Glare, sob reduzidas tensões aplicadas (regime de baixas tensões), tais como tipicamente desenvolvidas na aeronave em condições normais de serviço, passando por mecanismos mistos sob tensões cíclicas de intensidade intermediária (regime de medias tensões). As regiões, de altas tensões, medias e baixas são indicadas (aproximadamente) no gráfico da Figura 2.5, que mostra os resultados de ^aTARPANI et al (2006) relativamente à resistência à fadiga (curvas S-N) de juntas rebitadas de Glare, estas sendo ilustradas na Figura 2.6.

Figura 2.5 Curvas S-N das juntas de Glare com rebites verticais, ou alinhadas (vermelho), e horizontais, ou não-alinhadas (azul) (^aTARPANI et al, 2006).

visando-se basicamente garantir a simplicidade da sua inspeção pré- e pós-introdução de danos por fadiga, bem como a identificação quali- e quantitativa dos macro- e micromecanismos de falha desenvolvidos no conjunto rebitado. Assim sendo, pode-se já adiantar que não será possível a comparação direta, entre os resultados de LAZZERI (2001) e aqueles apresentados neste estudo.

Figura 2.6 *Corpos de prova de Glare: (a) Rebites alinhados (verticais), (b) Não-alinhados(horizontais) à direção do carregamento em fadiga axial (TARPANI et al, 2006).*

Uma característica fundamental dos trincamentos de juntas rebitadas de Glare sob tensões baixas e médias, é que eles alcançam grandes extensões nas lâminas metálicas internas das chapas do sanduíche Glare, unidas por rebite, sem que nucleação e crescimento ainda se manifestem nas lâminas externas, e, portanto, as trincas não são ainda visíveis por técnicas de inspeção puramente visuais.

Nas Figuras 2.7 a 2.10 são mostrados os aspectos tipicamente exibidos pelos corpos de prova com rebites alinhados e não-alinhados, respectivamente, que falharam por fadiga sob os níveis de tensão aos regimes de altas tensões e medias tensões mostradas na Figura 2.5.

Figura 2.7 (a) Face interna das chapas de Glare pertencentes ao corpo de prova com rebites alinhados fadigado sob tensão máxima de 77 MPa (altas tensões), que falhou catastroficamente após $3,87 \times 10^4$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da cabeça cônica do primeiro rebite a romper durante o mecanismo de fadiga. Observe a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006)

Figura 2.8 (a) Face interna das chapas de Glare pertencente ao corpo de prova com rebites alinhados fadigado sob tensão máxima de 56 MPa (medias tensões), que falhou catastróficamente após $6,41 \times 10^5$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da cabeça cônica de um dos rebites, em que se observam duas trincas longas partindo da respectiva furação, com marcas evidentes de oxidação (fretting) nas suas proximidades. Note a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006).

Figura 2.9 (a) Face interna das chapas de Glare pertencente ao corpo de prova com rebites não-alinhados fadigado sob tensão máxima de 70 MPa (medias tensões), que falhou catastróficamente após $6,85 \times 10^4$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da cabeça cônica de um dos rebites, em que se observam duas trincas curtas partindo da respectiva furação. Observe a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006).

Figura 2.10 (a) Face interna das chapas de Glare pertencente ao corpo de prova com rebites não-alinhados fadigado sob tensão máxima de 56 MPa (medias tensões), que falhou catastroficamente após $3,15 \times 10^5$ ciclos aplicados. As setas pretas cruzadas indicam a correspondência entre as furações das chapas; (b,c) Detalhe da lâmina metálica interna das chapas vistas em (a); (d) Detalhe da furação de um dos rebites, em que se observam marcas de oxidação (fretting) a partir das quais partem as trincas de fadiga. Note a correspondência entre a coloração das setas indicativas (^bTARPANI J.R.;2006).

Sob baixas tensões (Figura 2.5), FERNANDES et al (2004) e ^aTARPANI et al (2006) observaram que *fretting* seria o único, se existente, mecanismo de falha operante nas juntas fadigadas ate o limite máximo de 1 milhão de ciclos, adotado como referencial de parada dos ensaios de fadiga.

A análise fratógráfica feita por estes pesquisadores de alguns corpos de prova fraturados sob medias tensões confirmaram a prevalência de *fretting* como mecanismo de nucleação de trincas de fadiga, com a profusão de trincamentos secundários a partir das bordas das furações de rebites, mais especificamente emanando das superfícies de contato (*faying surfaces*) das laminas metálicas mostradas nas Figs. 2.7a, 2.8a, 2.9a e 2.10a. As Figs. 2.11 e 2.12 ilustram tais fenômenos, enquanto que a Fig. 2.13 comprova a ocorrência de fadiga.

Figura 2.11 (a,b) Vistas geral e detalhada de sítios de nucleação de trincas de fadiga por fretting; (c,d) Vistas geral e detalhada de descontinuidades originadas por desgaste superficial tipicamente desenvolvido segundo o mecanismo de fretting (^bTARPANI, J.R., 2006).

Figura 2.12 (a,b) Vistas geral e detalhada da borda de furação de rebite mostrando extensivo trincamento; (c) Vista de topo da superfície de fratura indicando a presença de micro-trincamento múltiplo a partir da borda de furação^(b)TARPANI J.R.;2006).

Figura 2.13 Distintos padrões locais de estriamento gerado por fadiga nas lâminas metálicas de Glare (a direção macroscópica de crescimento de trinca é a horizontal).

Desta forma, os trabalhos conduzidos e resultados obtidos por FERNANDES et al (2004) e ^aTARPANI et al (2006) suscitaram e reafirmaram a necessidade de se verificar a habilidade dos ensaios não-destrutivos na detecção, identificação e monitoramento da evolução de trincas por fadiga em juntas mecânicas de Glare.

Parece ser imperativo, portanto, adequação de procedimentos de ensaios não-destrutivos (END), que não o visual, de modo a se assegurar a integridade estrutural das juntas mecânicas desta nova classe de materiais de construção aeronáutica, e, por conseguinte, garantir a segurança das aeronaves em voo.

Os principais métodos rotineiramente utilizados na prática aeronáutica diária incluem o visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, raios-X, correntes parasitas e ultra-som (PIOTROWSKI et al, 2006; SEIDL, 1994&1995). Dentre estes, as técnicas mais adequadas aos propósitos do presente projeto de pesquisa seriam os raios-X e correntes parasitas, basicamente em face das especificidades e do padrão típico de trincamento destas juntas rebitadas, tal como vêm sendo amplamente reportado na literatura especializada (RANS & STRAZNICKY, 2005; de RIJCK, 2005; WOERDEN et al, 2003; HEIDA & PLATENKAMP, 2001; FAHR et al, 2000; RYAN & MONAGHAN, 2000). Mais exatamente, como demonstrado anteriormente neste texto, as trincas de fadiga nucleiam quase que invariavelmente nas bordas da furação dos rebites, e se propagam nas lâminas metálicas internas da junta sobreposta, perpendicularmente à direção de carregamento mecânico. Este processo de fratura não envolve substancial desenvolvimento de delaminações entre as diversas interfaces de Glare, justificando assim a limitada utilidade do método de ultrassom na caracterização de danos nestas juntas rebitadas. Dada a camada eletricamente isolante formada pelo composto vidro-epóxi em Glare, partículas magnéticas encontram também restrita aplicação, se alguma, neste tipo de junta. Por sua vez, líquidos penetrantes teriam utilidade única e exclusivamente no caso de trincas aflorando as superfícies externas do corpo de prova, o que, como já referido, ocorre apenas nos estágios mais avançados de trincamento das juntas de Glare, próximo da falha catastrófica do componente (^bTARPANI. J.R., 2007)

Em face dos recentes e tão propalados desenvolvimentos das técnicas de radiografia de raios-X, a saber, modalidades digital e tomografia computadorizada (NUKAGA & KAMIMURA, 2006; ARMISTEAD & STANLEY, 1997), optou-se no presente trabalho

por conduzir um programa *round-robin* informal entre diversas instituições comerciais e universitárias nacionais que trabalham há longo tempo, ou então iniciaram-se recentemente na arte, de modo a verificar o potencial da metodologia de raios-X, excetuando-se a radiografia computadorizada.

2.3 Radiografia por raios-X

2.3.1 Introdução

A técnica de radiografia aplicada à análise de materiais de engenharia foi originalmente apresentada à comunidade científica em 1913, porém somente foi aceita cerca de uma década depois, no ano de 1922 (BRAY, 2000).

A evolução das técnicas de raios-X na medicina moderna tem sido continuamente repassada à indústria, em especial à aeronáutica e à aeroespacial (ARMISTEAD & STANLEY, 1997). Isto tem possibilitado excepcional rapidez, com imagens em tempo real (e.g., em apenas 2 horas e possível obterem-se 800 imagens em corte de uma peça do tamanho de um cabeçote de motocicleta para reconstituição tri-dimensional - NUKAGA & KAMIMURA, 2006), e elevado grau de precisão nos diagnósticos de falhas e prognósticos de integridade de componentes estruturais (GREEN, 2000). No entanto, os altos custos envolvidos na aquisição e operação de um tomógrafo computadorizado industrial, orçado na base de vários milhões de dólares, ainda dificultam seu uso rotineiro pela indústria aeronáutica mesmo dos países ditos industrializados, ou de primeiro mundo. No Brasil, o uso de radiografia de raios-X tem se restringido basicamente ao método tradicional de filmes ou películas à base de prata, com a modalidade digital sendo aplicada em escala muito reduzida na avaliação de integridade de componentes e dispositivos elétricos (GODOI, 2005; SHINOHARA et al, 2002) e petro-químicos (^{a,b}JOSE et al, 2003). No entanto, num futuro de médio prazo prevê-se que a técnica se tornará uma ferramenta vital para avaliação não-destrutiva de integridade estrutural na grande área da mobilidade, em especial a aeronáutica.

Embora ainda haja certa restrição ao uso de raios-X na avaliação de integridade estrutural de componentes aeronáuticos confeccionados em laminados compostos (CAPRIOTTI et al, 2000; HEWITT, 1998; SMITH, 1996; CARTZ, 1996; TEAGLE, 1983), visto que a incidência do feixe de raios-X perpendicularmente aos defeitos planos (e.g. delaminações são o tipo de danos mais comuns nestes materiais) produz geralmente imagens radiográficas com baixa resolução, a aplicação, embora ainda bem limitada (item 2.3.3), das técnicas radiográficas aos chamados laminados metal-fibra avariados por fadiga tem se mostrado bastante promissora, haja visto que a fase metálica é aquela que é essencialmente danificada (^{a,b}KUIJPERS et al, 2002;VLOT, 2001).

2.3.2 Bases da radiografia convencional por raios-X

Raios-X são emitidos sempre que a matéria é bombardeada por um feixe acelerado de elétrons. A Figura 2.14 mostra os esquema de um tubo de raios-X. Elétrons são emitidos da superfície do filamento (catodo, geralmente de tungstênio) quando aquecido. Uma elevada diferença de potencial é aplicada entre o catodo e o anodo acelerando os elétrons em direção ao anodo (este sendo o alvo, também confeccionado em W) em um feixe focado. Os elétrons previamente acelerados interagem então com os átomos do anodo produzindo raios-X. Basicamente o processo consiste em deslocar elétrons do alvo de suas posições originais para níveis de mais alta energia (nestas circunstâncias o elétron absorve um quantum energético, ou fóton); na volta ao seu estado natural, ou de equilíbrio, o elétron libera este fóton de radiação eletromagnética na faixa de frequência dos raios-X. Estes são emitidos a partir do anodo em todas as direções, porém enquanto a maioria é absorvida pela blindagem que envolve o bulbo de vidro, parte substancial escapa através da janela do bulbo para forma um feixe divergente de radiação (BRAY, D.E., 2000).

Figura 2.14 Elementos essenciais de um tubo de raios-X.

A descrição abaixo corresponde aos elementos essenciais da maioria dos equipamentos industriais de raios-X. É possível gerar raios-X com energias de até 30 MV, porém isto requer o uso de aceleradores lineares, os quais são muito volumosos e pesados para serem utilizados como unidades móveis. Equipamentos móveis produzindo raios-X com energias acima de 400 kV são freqüentemente utilizados (Figura 2.15). Isto permite inspeção em campo de, por exemplo, peças de aço com até 100 mm de espessura. Para maiores espessuras, empregam-se fontes de raios gama, ou seja, radioisótopos (Fig.2.16) denominando-se, neste caso, gamagrafia. Desta forma o parâmetro KV (Kilovoltagem) define o poder de penetração do feixe de radiação obtido.

Existem basicamente dois tipos de tubos no mercado, o de feixe de radiação direcionado (cone de radiação) e o feixe panorâmico, que diferem na amplitude do campo inspecionado. O poder de penetração deste equipamento é menor que os chamados raios-X de potencial constante, e, conseqüentemente, o tempo de exposição requerido é maior. No entanto, a definição das imagens é bastante superior, em especial nos metais e ligas leves, tais como as de titânio e de alumínio. A flexibilidade na escolha da energia dos raios-X do dispositivo a ser empregado é também vantajosa sobre o equipamento de potencial constante, pois permite um controle apurado da capacidade de penetração da radiação ionizante.

Figura 2.15 Exemplos de fontes móveis industriais de raios-X.

A inspeção radiográfica utiliza as características de absorção de um material sob teste para produzir uma imagem de raios-X em um filme. Isto é conseguido irradiando-se a peça avaliada com o filme radiográfico colocado atrás dela. A radiação é absorvida pela peça numa proporção que depende da sua espessura, densidade e massa atômica. Quanto mais espessa a peça, mais densa, e maior a sua massa atômica, mais radiação será por ela absorvida e menos sensibilizado ficará o filme (mais claro ele será quando da sua revelação). Inversamente, quanto mais fina a peça, menos densa, e menor sua massa atômica, menos radiação ela absorverá e, conseqüentemente, o filme será mais sensibilizado, ficando mais escuro durante a sua revelação, tal como mostra a Figura 2.17.

Figura 2.16 Fontes de Irídio-92, Selênio-75 e Cobalto-60 (radiosótopos).

Figura 2.17 *Princípios básicos da radiografia convencional por filmes* (BRAY, D.E., 2000).

A escolha da Kilovoltagem (kV) adequada para cada situação específica não está unicamente vinculada à obtenção de raios-X suficientemente energéticos para penetrar numa peça, mas encontra-se fundamentalmente associada ao fato dela (a kV) governar o contraste da imagem resultante. Kilovoltagens mais baixas conduzem a maiores contrastes. Entretanto, reduzidas Kilovoltagens demandam maiores tempos de exposição para se alcançar uma radiografia satisfatória. Em adição, quanto maior o contraste, menor o intervalo de espessuras que poderá ser inspecionado durante uma única exposição.

Portanto, a seleção da Kilovoltagem é, freqüentemente, uma questão de compromisso entre requisitos conflitantes de uma inspeção. A sensibilidade de uma

inspeção é frequentemente expressa em termos da menor diferença de espessura que pode ser detectada numa radiografia. Para a maioria das aplicações, é geralmente aceito que a detecção de um gradiente de 2% na espessura representa uma sensibilidade aceitável. No entanto, esta é somente uma definição de contraste radiográfico aceitável, e não leva em consideração os requisitos de boa definição da imagem, que podem prevalecer para uma dada aplicação.

No caso da detecção de trincas, defeitos que, em princípio, possuem abertura entre as faces próxima de zero, a orientação do feixe com relação ao plano da trinca é de fundamental importância, tal como ilustra a Figura 2.18 feixes ortogonais ao plano de trinca podem nem mesmo indicar sua presença (neste caso o método não-destrutivo mais adequado seria o de ultrassom), enquanto que feixes de raios-X paralelos ao plano produzem máxima indicação da trinca.

Figura 2.18 Efeito da orientação do defeito avaliado, com relação ao feixe de radiação incidente, na capacidade de detecção da descontinuidade e na qualidade das imagens obtidas por radiografia convencional (ASKELAND, 1994).

Na Figura 2.19 uma sequência de fotos ilustra o procedimento tradicionalmente utilizado na indústria, inclusive aeronáutica, de fixação de imagens em filmes radiográficos convencionais, sua revelação e análise dos negativos correspondentes.

Figura 2.19 (a) Tanque com produtos químicos utilizado no processo de fixação de imagem em filme ou película radiográfica após sensibilização por radiação; (b) Revelação das imagens em câmara escura; (c) Análise do negativo (com negatoscópio) em busca de defeitos no objeto radiografado.

É interessante notar que as radiografias médicas apresentam muito menos contraste que as industriais. Isto decorre do fato de que para se alcançar altos contrastes utilizam-se baixas kV, sendo necessários, portanto, longos tempos de exposição, conforme anteriormente mencionado. Para os seres vivos, longos tempos sob a ação de radiação ionizante significam maiores riscos à saúde. Deste modo, exposições em ambiente médico

duram entre 1 e 2 segundos, enquanto que, na indústria, se prolongam freqüentemente até três minutos. Até o momento, somente os efeitos da kV no tempo de exposição foi discutido, embora esta última variável seja também grandemente influenciada pela intensidade da radiação utilizada e da distância entre a fonte de raios-X e o filme radiográfico. Quanto maior esta distância melhor a definição da imagem, porém maior o tempo de exposição por um fator quadrático. Outros fatores que afetam a qualidade radiográfica incluem: tamanho da fonte/alvo, que, quanto maiores, menor a sensibilidade e a definição da imagem; velocidade do filme, que, quanto mais rápida, menor é o tempo de exposição e maior o contraste da imagem, porém acompanhado pela perda de sensibilidade e definição da mesma (PARDIKAR R.J., 2006).

Diferentemente da potência de penetração da radiação, medida em termos de KV, a sua intensidade é governada pelo número de elétrons que bombardeiam o alvo, sendo medida por um mili-amperímetro colocado em série com o catodo. Infelizmente, o número de elétrons e, conseqüentemente, a corrente elétrica que pode ser usada é limitada pelo fato de que a energia dissipada no anodo não é simplesmente transformada em fótons, mas também, e principalmente, em calor. É exatamente este aquecimento que impõe um limite no quão pequeno pode ser o ponto focal sem que ocorra a fusão local do material do alvo. O calor produzido no anodo pode ser dissipado por resfriamento natural, ou ser auxiliado por ventilação de ar forçado ou mesmo por circulação de água.

2.3.3 Bases da radiografia digital por raios-X

Diferentemente da modalidade de radiografia convencional, que se utiliza de filmes ou películas radiográficas à base de bromato de prata, que são sensibilizadas pela radiação ionizante e posteriormente reveladas em laboratório fotográfico, a radiografia digital ou computadorizada (RC), mais moderna e avançada, faz uso de telas sensoras confeccionadas em materiais cerâmicos semicondutores (NUKAGA J.,2006).

De fato, duas variantes desta técnica radiográfica são hoje disponíveis no mercado, e detalhadas na seqüência:

- 1) Tempo real ou método direto, quando painéis planos (*real time flat panels* – Figura 2.20) confeccionadas em material semicondutor (e.g., Si amorfo, Iodeto de Césio estruturado) estão diretamente ligados a computadores, ocorrendo a imediata conversão da intensidade da radiação em informação de imagem digital, que é instantaneamente visualizada na tela. Desta forma, exposição e formação de imagens ocorrem simultaneamente, possibilitando a captura de imagem em tempo real, alcançando-se taxas de exibição tão elevadas quanto 30 imagens por segundo. Este modo de aquisição de imagens em tempo real é denominado de radioscópico. Em outra modalidade, de tempo quase-real, ocorre um retardo da ordem de alguns segundos entre a captura e a exibição da imagem. O custo de um painel plano empregado em radiografia direta gira em torno de U\$50,000.00 podendo ser re-utilizada, em princípio, indefinidamente desde que seja mantida sua integridade. Outra desvantagem da técnica seria o relativamente grande peso da placa de captura de imagens, chegando à casa dos 20 kg. Nestas circunstâncias, torna-se praticamente indispensável o uso de um sistema de posicionamento robótico de modo a minimizar os riscos de danos do equipamento durante as inspeções, o que eleva ainda mais o custo global desta modalidade de radiografia digital. Estes painéis invariavelmente incorporam um controlador de temperatura, permitindo intervalos maiores de calibração, possibilitando imagens rápidas e consistentes. A resolução espacial padrão dos painéis é da ordem de 200 microns, permitindo o processamento de imagens com 16 bits de tonalidades de cinza e tamanho 1024 x 1024 pixels (RAVINDRAN V.R.,2006).

Figura 2.20 Painel plano de Si para radiografia digital direta.

- 2) Tempo próximo ou método indireto, utilizando-se telas ou placas de imagem (*imaging plates-IP*) de compostos de fósforo que são ativadas pela radiação eletromagnética ionizante, as quais são posteriormente lidas por varredura em um *scanner* óptico de imagens e, finalmente, são processadas em um computador. Mais precisamente, a radiação (raios-X ou gama) que alcança a placa excita os elétrons da camada formada por cristais de fósforo, de um modo análogo à luz ativando os grãos de haleto de prata em um filme convencional, com o número de elétrons excitados sendo proporcional à quantidade de radiação que atinge a placa. Como resultado da excitação eletrônica, uma imagem latente temporária é “armazenada” na placa de fósforo. A placa é então varrida por um feixe de laser, emitindo luz no interior do *scanner*, a qual é capturada num fotomultiplicador revelando uma imagem digital latente através da luminescência da camada de fósforo, com a intensidade da luminescência proporcional ao número de elétrons originalmente excitados durante a exposição à radiação. A luz emitida é então capturada por um sensor de luz e convertida em uma imagem digital que é exibida em uma estação de computador. Uma vez exibida, a imagem pode ser manipulada (e.g., inversões de

tonalidade, mudanças de contraste, densidade, aplicação de filtros, etc), porém o arquivo original da imagem permanecerá inalterado. A partir deste estágio, a imagem pode ser transferida e termicamente impressa sobre um filme radiográfico digital. Desta forma a radiografia digital de placa de fósforo pode ser considerada, assim como a radiografia convencional, um processo de duas etapas, em que a imagem não é formada diretamente. Ao contrário, no entanto, da modalidade convencional em que a imagem latente é armazenada em cristais aloenados de prata e revelada quimicamente, na radiografia digital a imagem permanece latente na placa de fósforo sensível à radiação, sendo revelada fotonicamente. Esta técnica é bem mais econômica e prática do ponto de vista operacional se comparada ao método direto (tempo real), visto que o custo de uma placa de radiografia indireta é cerca de um décimo da direta, algo como U\$5.000, com uma vida útil estimada em 3 a 5 mil re-usos, podendo-se chegar a números entre 10 mil e 15 mil vezes, segundo alguns autores, caso os devidos cuidados no manuseio sejam respeitados. O re-uso da placa é possível após a imagem ter sido lida, digitalizada e apagada. O processo de apagamento da imagem é realizado expondo-se a placa à radiação intensa, brilhante na frequência do infravermelho. Embora isto remova a imagem latente da placa, tem sido verificado que o processo deixa a placa embaçada, o que afeta a qualidade da imagem subsequente. De modo a minimizar o efeito, várias combinações de fontes de radiação têm sido testadas no processo de remoção de imagem prévia. As mais bem sucedidas foram a luz branca intensa e uma sequência de luz de vapor de sódio seguida da aplicação de luz infravermelha.

A Figura 2.21 mostra um equipamento completo de radiografia digital industrial de última geração.

Figura 2.21 (a) Sistema industrial completo de radiografia digital pelo método indireto; (b) Placa de captura de imagens; (c,d) Duas possibilidades de leitura das placas sensibilizadas por radiação; (e) Exibição de resultados da inspeção por raios-X na tela de computadores (<http://www.geinspectiontechnologies.com/index.html>).

Na Figura 2.22 é mostrado um *scanner* de equipamento de radiografia digital originalmente desenvolvido para aplicações odontológicas. Frequentemente, e, segundo alguns, inadvertida e equivocadamente, tais sistemas são utilizados para aplicações industriais. No Brasil, isso tem ocorrido mais frequentemente em inspeções de plantas petroquímicas.

Figura 2.22 Sistema de leitura por laser de telas de fósforo para uso odontológico.

Na Figura 2.23 é mostrada a sequência de operações que compõem a execução de processamento da imagem radiográfica digital, que não requer câmara escura nem o emprego de produtos químicos.

Figura 2.23 Ciclo completo de obtenção de imagens radiográficas pelo método digital indireto após a sensibilização da placa de imagens por raios-X ou γ , cuja duração frequentemente não supera os 3 minutos (<http://www.arctest.com.br>).

Segundo BAVENDIEK et al (2006), DIAMOND (2006), ANDERL, T.R. (2002), além do site <http://www2.robins.af.mil/>, a utilização da técnica digital traz grandes e inúmeras vantagens frente à radiografia convencional, dentre as quais se destacam:

- (i) Menor tempo de exposição, pois as telas de fósforo são “mais rápidas” e sensibilizam-se com até 20 vezes menos radiação do que os filmes radiográficos Classe II. Em geral o tempo de exposição oscila entre 5 a 10% dos tempos tipicamente utilizados para filmes convencionais;
- (ii) Como decorrência da “maior rapidez” das placas frente aos filmes de prata convencionais, a técnica digital permite utilizar fontes de raios-X de baixa potencia ou gama de baixíssima atividade (implicando em reduzida dose de radiação por

parte do operador, e.g., 18,5 GBq à 370 GBq (0,5 à 10 Ci) de Se-75; 370 GBq (10 Ci) de Ir-192, o que proporciona significativa redução das áreas de balizamento, fator este que muitas vezes dificulta ou mesmo impede a realização de radiográfica em áreas de operação e manutenção (TOBER & SCHILLER, 2000), possibilitando, desta forma, conviver com outras atividades produtivas simultâneas;

(iii) Eliminação das etapas demoradas de revelação e fixação dos filmes convencionais, dispensando-se a câmara escura e necessitando apenas de sala com penumbra de aproximadamente 10 lux. Além da redução de toda a infra-estrutura de iluminação específica, eliminam-se os tanques de processamento, o armazenamento de produtos químicos, os rejeitos, etc, o que tem grande impacto ambiental. Inclui-se também no computo de economia proporcionada pelas técnicas digitais, a expressiva redução do número de pessoas envolvidas nestas operações unitárias;

(iv) Não requer equipamento sofisticado para mostrar as imagens, permitindo a geração de imagens em computadores pessoais;

(v) Simplificação das operações de campo (frequentemente encontradas no campo aeronáutico) através do uso de *scanners* portáteis, de sorte que o tempo de leitura (ciclo de processamento) oscila entre 2 e 5 minutos;

(vi) O intervalo dinâmico mais amplo (o qual está basicamente associado à gama de tons cinza que cada unidade de pixel permite) das telas sensoras frente aos filmes radiográficos torna-as mais ecléticas, permitindo a inspeção de seções com espessuras variadas por intermédio de apenas uma única tomada, evitando-se, por exemplo, múltiplas tomadas, sub- e super-exposições e o conseqüente desperdício de tempo e materiais no caso do uso de filmes;

(vii) As telas são surpreendentemente flexíveis, podendo se adequar a variados formatos de superfície, além de suportarem temperaturas de até 320°C;

(viii) O arquivamento das imagens digitais possibilita o acesso e visualização imediata no monitor e seu aprimoramento por intermédio de controles informatizados, de maneira que um detalhe de indicação de defeito originalmente imperceptível pode ser revelado por manipulação das imagens com ferramentas de ampliação, contraste, brilho, inversão de tons e filtros de relevo (efeito 3-D), para citar algumas variáveis.

Segundo especialistas independentes na área de radiografia digital, que prestam inúmeros serviços à Petrobrás e preferiram não se identificar: *“Na radiografia digital, devido ao fato das imagens serem rasterizadas (i.e., formadas por um arranjo de pontos ou pixels), a sua resolução espacial é intrinsecamente menor que a obtida pela radiografia convencional (filmes ou películas). Na verdade, as placas de imagens ainda estão muito longe da resolução dos filmes. A Kodak acabou de lançar no mercado uma placa de imagem que tem 20% a mais de resolução espacial do que a anterior (i.e, 36 microns) mas ainda assim bem aquém dos filmes (12 microns) em termos de resolução. Porém, como a interpretação da imagem ainda é visual, e vai ser ainda durante muito tempo, a limitação é ocular e com isso não há empecilhos para o uso das placas, pois as resoluções que possuem estão dentro do limite visual humano (sic). Quanto às placas de vídeo, também não há problema, pois a resolução em profundidade de cor usada hoje para análise é de 8 bits, de forma que os 12 ou 14 bits que os aparelhos mais modernos possibilitam ainda não são necessários. Os fabricantes vendem hoje sistemas completos com placas, monitores de alta resolução LCD (liquid crystal display) em tamanho próprios de tela para filmes industriais que resultam em alta qualidade de imagem. O gargalo da utilização ainda de radiografia computadorizada no Brasil é a falta de procedimentos qualificados adequadamente, e exigência dos compradores destes serviços de que seja utilizada a radiografia digital. Quando isto acontecer, e já estamos na iminência desta ocorrência, haverá um "boom" da radiografia digital em quase todos os setores da indústria. O resultado desta menor resolução espacial resulta na preocupação do projeto de norma européia em utilizar dois tipos de indicadores; um para avaliar a resolução espacial e outro para o contraste. Portanto, ao contrário da radiografia convencional que avalia as radiografias com o auxílio de um único indicador (de sensibilidade ou contraste), as radiografias computadorizadas são avaliadas com uso de dois indicadores: um para resolução espacial e outro para o contraste”.*

Merece ser destacado que, com o advento da radiografia digital, novos termos e conceitos relativos a parâmetros de qualidade para os detectores de imagens foram criados e introduzidos na literatura tecno-científica, sendo alguns deles: *contrast resolution, detective quantum efficiency (DQE), exposure dynamic range, limiting spatial resolution, signal-to-noise ratio, modulation transfer function (MTF), uniformity*. Ao leitor que queira melhor se informar neste sentido, são sugeridas as seguintes referências: BOCKAERT (2006), VIDYASANKAR(2005), COLE(2005).

Os entrevistados enfatizam que “...para que seja possível utilizar os recursos da radiografia digital, de modo produtivo, viável e confiável, faz-se necessário corrigir algumas nuances tipicamente desenvolvidas durante o registro das imagens nas placas de fósforo, em que imagens são intensificadas, dentre as quais destacam-se a típica distorção geométrica projetada, a penumbra, sombra e fantasmas proporcionados pelas imagens radiográficas proveniente dos objetos inspecionados, os quais têm suas áreas de interesse distantes das placas de fósforo, estas últimas exibindo um intervalo dinâmico ainda relativamente limitado (embora muito superior aos filmes radiográficos). Tem também especial influência, na geração destes “artefatos”, a distância fonte-sensor...”.

A Tabela 2.4 (^{a,b}JOSE et al, 2003) fornece uma comparação simplificada quanto às características específicas do ensaio radiográfico nas modalidades convencional e digital.

Tabela 2.4 Diferenças básicas entre radiografia nas modalidades convencional e digital em tempo próximo (^{a,b}JOSE et al, 2003).

RADIOGRAFIA CONVENCIONAL	RADIOGRAFIA DIGITAL
(A)PREPARAÇÃO	
<i>São necessárias pelo menos 2 horas de antecedência aos testes de campo para a preparação dos filmes, suas identificações e carregamento.</i>	<i>Não é necessário nenhum preparo antes da execução do trabalho de campo.</i>
B)PELÍCULA	
<i>As películas comumente chamadas de filmes possuem vários tamanhos, conhecidos, e podem ser facilmente cortados e adaptados aos tamanhos das peças.</i> <i>Possuem várias classes normalizadas, com velocidades e sensibilidades diferentes proporcionando grande flexibilidade para a escolha do filme em função da detectabilidade exigida para cada equipamento.</i> <i>São sensíveis à luz antes e depois da</i>	<i>Para este sistema as películas são denominadas telas ou placas; atualmente dispõem-se de 2 tamanhos 150 x 300 mm e 75 x 150 mm.</i> <i>São sensíveis à luz somente após expostas à radiação ionizante.</i> <i>A sensibilidade da placas (granulometria) é medida por D.P.I.: 300 x 300 dpi correspondem a um filme Classe II ASTM.</i> <i>O tempo de leitura óptica, i.e. escaneamento, é de 2 min e 37 seg. por placa de 150 x300 mm, ou até 4 placas de</i>

<p><i>exposição à radiação ionizante.</i></p> <p><i>Necessitam de ser revelados e fixados em químicos e lavados em água corrente. O processo demora entre 40 minutos e 1 hora até a secagem.</i></p> <p><i>Após o laudo devem ser armazenadas em local, livre de umidade e ocupam espaços muito grandes.</i></p>	<p><i>75 x 150 mm.</i></p> <p><i>Em aproximadamente 10 minutos são radiografados e escaneados 450 cm² de área inspecionada</i></p> <p><i>Após a leitura no scanner, deve ser exposta à luz para tornar a ser sensibilizada.</i></p> <p><i>Após o laudo são armazenadas em meio eletrônico fixo ou móvel.</i></p>
C)EQUIPAMENTOS -LABORATÓRIO	
<p><i>É necessária uma sala escura climatizada com áreas úmida e seca separadas.</i></p> <p><i>Quando do processamento ou revelação, ambas devem ser totalmente escuras, dotadas de tanques e lanternas de segurança.</i></p>	<p><i>Necessita-se de uma sala climatizada ou de laboratório móvel, para a instalação do computador e do scanner óptico. Dispensa-se o uso de que a sala seja totalmente escura bastando apenas que não tenha sobre o scanner uma luz direta. Uma penumbra é requerida somente quando se manuseiam as placas quando de sua colocação no carrossel.</i></p>
D)PROCESSAMENTO	
<p><i>Após o término das atividades de campo se faz necessário o processamento dos filmes radiografados, este processo é feito em duas etapas básicas:</i></p> <p><i>Revelação: Revelação, Lavagem e Fixação; Secagem: Em estufas.</i></p> <p><i>Obs: Este ciclo leva em torno de 1,5 h (uma hora e meia).</i></p>	<p><i>As atividades de laboratório acontecem simultaneamente com as atividades de campo, pois basta remover a placa de fósforo do chassis e colocá-la no carrossel, aciona-se a leitura através do computador para que a imagem seja escaneada.</i></p> <p><i>Obs: Este ciclo leva em torno de 2' 37".</i></p>
E) LAUDO	
<p><i>Após os filmes estarem completamente secos, o inspetor, inicia o laudo utilizando como recurso o negatoscópio dotado de controle de intensidade de luz, lupas e régua milimetradas.</i></p>	<p><i>Quando do término da leitura óptica, imediatamente o inspetor inicia o laudo utilizando vários recursos do software de processamento de imagens (e.g, Vix Win[®]), como Baixo Relevo, Inversão de Tonalidades, Lupas, Ferramentas de Medição (com precisão de 100 microns).</i></p>

Apesar de a técnica de radiografia digital industrial estar sendo progressiva difundida (BAVENDIEK et al, 2006; PARDIKAR, 2006; RAVINDRAN, 2006; BLAKELEY, 2004; BRON et al, 2004; <http://www2.robins.af.mil>), ela ainda está muito longe de atingir a posição alcançada pela radiografia análoga tradicional por filmes e películas, por motivações que vão desde preconceitos até altos custos de investimento inicial nos equipamentos e treinamento de pessoal.

Por fim, na Tabela 2.5 (DIAMOND, 2006) realiza uma comparação em termos de custos envolvidos nestas duas modalidades de radiografia, da qual se conclui por uma economia significativa por parte da digital (US\$64.670 anuais em uma dada tarefa típica de inspeção de componentes aeronáuticos), frente à convencional.

Tabela 2.5 Custos unitários e anuais (em U\$) das duas modalidades de raios-X nos diversos procedimentos envolvidos na obtenção de imagens em uma determinada tarefa de inspeção aeronáutica (DIAMOND, 2006).

	Raios-X Convecional		Raios-X Digital	
	Unidade (U\$)	Anual (U\$)	Unidade (U\$)	Anual (U\$)
Fotografia	6,00	43500,00	3,00	21750,00
Revelação	4,50	32625,00	0,00	0,00
Filme, acessórios e química	2,50	18125,00	0,03	217,50
Preparo do Laudo	3,00	21750,00	3,00	21750,00
Laboratório	1,00	7250,00	1,00	7250,00
Manutenção	1,00	7250,00	2,20	15950,00
Armazenagem	0,02	1450,00	0,05	362,50
Total	19,02	131950,00	9,28	67280,00
Diferença (economia) em favor da Digital			8,74	64.280,00

No entanto, BOWMAN et al (2003) ainda fazem algumas restrições a esta modalidade da radiografia de raios-X, enfatizando que, em alguns casos, a resolução obtida é bem inferior à dos filmes convencionais, o que está diretamente associado ao tamanho do

pixel das telas sensoras, se comparada à resolução de imagem proporcionada pelos filmes convencionais de prata, tal como já anteriormente mencionado.

2.3.4 Inspeção radiográfica em campo

A Figura 2.24a ilustra um exemplo de radiografia por raios-X aplicada à uma junta rebitada de Glare ensaiada em ambiente de laboratório. Ela é similar àquela utilizada como reparo da fuselagem de uma aeronave Airbus A310, colocada em teste no período de 1999 a 2004 e exposta, portanto, às condições reais de serviço. É mostrada na Figura 2.24b BASTIAN F.L. (2003).

Observa-se claramente na primeira das figuras abaixo a presença de trincas duplas partindo da borda de duas furações de rebites, e se propagando nas lâminas metálicas internas (*faying surfaces*) das chapas do híbrido metal-fibra que operam contato durante o carregamento cíclico. Como as trincas, longas o suficiente para que interajam umas com as outras, se propagam internamente à junta, elas não são detectáveis durante uma inspeção puramente visual, requerendo, portanto, métodos mais sofisticados de ensaios não-destrutivos, conforme amplamente já discutido no presente texto.

(a)

(b)

Figura 2.24 (a) Imagem de raios-X de uma junta fadigada de Glare (cerca de 200.000 ciclos de tensão trativa flutuante aplicados), idêntica à utilizada no reparo da fuselagem de uma aeronave de teste conforme, mostrado em (b). ^{a,b}KUIJPERS et al (2002).

MATERIAL E CORPOS DE PROVA

CAPÍTULO

3

3.1 Material

Foram utilizadas chapas do laminado metal-fibra Glare classificação 5 (Glare-5), esquematizado na Figura 3.1, constituídas por 2 lâminas externas de liga-Al 2024-T3, com 0,5 mm de espessura cada, que compactam 4 mantas unidirecionais de uma mistura de fibras de vidro-resina epóxi justapostas alternadamente com simetria central (i.e., $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$), perfazendo assim uma espessura total do laminado metal-fibra de 1,6 mm.

Nos LMF a seqüência de empilhamento é designada por uma nomenclatura do tipo m/n, onde n indica o número de camadas de pré-impregnado (onde uma camada pode conter mais que uma única orientação de fibras) intercaladas com m camadas de liga de alumínio. Nestes materiais tem-se sempre $m = n + 1$ (ASKELAND, 1994). Por exemplo, no Glare presentemente avaliado $n = 1$ e $m = 2$, daí a especificação Glare-5 2/1.

A Figura 3.2 mostra algumas das placas recebidas pelo SMM-EESC-USP por doação, no ano de 2001, de uma empresa americana (Aviation Equipments - CA), distribuidora de materiais de construção aeronáutica fabricados pela canadense Comtek Ltd.

A Figura 3.3 ilustra em detalhes as microestruturas das fases que compõem o LMF Glare-5, tal como observadas após polimento e ataque químico.

(a)

(b)

Figura 3.1 Duas maneiras de descrever a arquitetura do LMF Glare classificação 5: arranjo simétrico 2/(0/90)_s.

Figura 3.2 Placas de Glare-5 fabricadas pela firma Comtek (CAN) e doadas pela empresa Aviation Equipments (CA-USA).

(a)

(b)

Figura 3.3 Duas ampliações das microestruturas (a) da liga de alumínio 2024-T3, e (b) das fibras fortalecedoras de vidro S2. A direção longitudinal (0°), referente à de laminação do Al-2024, corresponde à largura da página. Ataque químico Keller.

A liga de Al 2024-T3 tem a seguinte composição química nominal: 4,4 Cu, 1,5 Mg, 0,6 Mn, 93,5 Al (% em massa). O tratamento termo-mecânico designado por T3 corresponde à solubilização, seguida por trabalhado a frio e envelhecimento natural até uma condição estável.

A Figura 3.4 mostra a curva de tensão versus deformação de Glare-5 obtida a partir do ensaio de tração monotônico axial quase-estática de corpos de prova com formato “gravata” ou “osso de cachorro” (*dog-bone*). Estes são vistos em detalhes na Figura 3.5, e obedecem as diretrizes estabelecidas na norma ASTM-E606-99 (2001) destinada aos materiais metálicos monolíticos. Ainda na Figura 3.4, é fornecida a curva de tração da principal liga de alumínio concorrente de Glare-5, qual seja, a 2024-T3, fornecida na forma de chapas laminadas com espessura de 1,6 mm (idêntica à do Glare) pela Embraer S/A. A microestrutura desta liga concorrente é ilustrada na Figura 3.6.

Os ensaios de tração monotônica uniaxial quase-estática foram conduzidos por ^bTARPANI et al (2006) à temperatura ambiente, sob uma taxa de carregamento de 1 mm/min. As deformações sofridas pelos espécimes foram continuamente monitoradas durante os ensaios por intermédio de um extensômetro MTS-632.26-C20 com abertura inicial, L_0 , de 8 mm, acoplado à seção útil dos corpos de prova, até que a fratura completa dos espécimes se estabelecesse.

Figura 3.4 Curvas de tração monotônica axial quase-estática do Glare-5 e da liga-Al 2024-T3 concorrente (^bTARPANI et al, 2006).

Figura 3.5 Projeto dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração axial quase-estática do Glare e da liga Al-2024-T3.

Figura 3.6 Microestrutura típica da liga Al-2024-T3: (a) Sem ataque; ((b) Ataque com reagente de Keller.

A Tabela 3.1 lista as propriedades mecânicas em tração do Glare-5 e da liga-Al 2024-T3 na temperatura ambiente, obtidas a partir de corpos de prova do tipo gravata (*dog-bone*), sem a presença de concentradores de tensão.

Tabela 3.1 Resultados dos ensaios de tração monotônica axial de Glare e da liga 2024-T3 (média de três ensaios para cada condição avaliada, em corpos de prova lisos sem concentradores de tensão).

Propriedade	Glare - 5	Alumínio 2024 - T3
Módulo de Elasticidade	70 ± 07 GPa	83 ± 0,7 GPa
Resistência a Tração	571 ± 16 GPa	475 ± 12 GPa
Deformação na Carga Máxima	2,8 ± 0,3%	> 10%

Como pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 3.4, bem como dos dados fornecidos na Tabela 3.1, o laminado Glare-5 exibiu uma tensão de ruptura significativamente superior à da liga de alumínio monolítico, basicamente devido à alta resistência mecânica das fibras fortalecedoras de vidro, estimada como sendo da ordem de 3 GPa.

Como consequência, a deformação na carga máxima, levemente abaixo dos 3%, foi muito menor, menos que um terço que a da liga metálica pura. A mudança de inclinação da curva de carregamento, denotando em princípio o limite de escoamento da fase metálica foi muito aquém daquela exibida pela liga monolítica 2024-T3, o que, em parte, pode ser resultado de eventuais diferenças na composição química e no grau de texturização das ligas pura e compoendo o laminado metal-fibra, respectivamente. O módulo de elasticidade dos dois materiais foi praticamente idêntico, conforme mostram os dados listados na Tabela 1, o que é razoável tendo em vista que a rigidez das fibras de vidro é muito próxima da liga de alumínio de grau aeronáutico.

Ainda na Figura 3.4, são fornecidas as curvas resultantes de ensaios tração para os materiais concorrentes porém agora com a presença de concentradores de tensão nos corpos de prova anteriormente mostrados na Figura 3.5.

Dois entalhes com perfil circular, exibindo raio de curvatura de 3 mm cada, foram introduzidos por usinagem mecânica (fresamento) em ambas as laterais dos corpos de prova, na região central da seção útil (Figura 3.7). O fator de concentração de tensão com

base na seção líquida do espécime entalhado, (*net*) K_t , foi estimado numericamente em 1,25, caracterizando assim uma concentração branda de tensões.

O efeito da presença destes concentradores geométricos de tensão é o mesmo para os dois materiais, conforme mostram as curvas plotadas na Figura 3.4. Basicamente, existe uma tendência ao leve aumento do limite de resistência à tração (valor nominal calculado na mínima seção líquida nos espécimes entalhados) e uma sensível redução, em especial na liga metálica monolítica, do alongamento dos espécimes. Em outras palavras, a resistência mecânica aumenta às expensas da ductilidade dos materiais, como era de se prever.

Figura 3.7 Projeto dos corpos de prova entalhados utilizados nos ensaios de tração axial quase-estática de Glare e da liga Al-2024-T3.

3.2 Corpos de prova rebitados

Corpos de prova do tipo junta rebitada sobreposta simples (*single shear riveted lap joint*), idênticos aos utilizados por FERNANDES et al (2004) e ^aTARPANI et al (2006), mostrados anteriormente na Figura 2.6, foram ensaiados no presente estudo. Dois rebites de grau aeronáutico foram empregados pela Embraer S/A na montagem de cada corpo de prova, em dois distintos arranjos ou disposições, respectivamente alinhados (vertical) e não-alinhados (horizontal) em relação à direção de carregamento em fadiga axial trativa.

A Figura 3.8 mostra um croqui dimensionado e a respectiva foto de um corpo de prova Glare-Glare com 2 rebites horizontais, i.e., não-alinhados em relação à direção de carregamento em fadiga.

No caso dos corpos de prova com rebites verticais (alinhados) as dimensões e tolerâncias foram idênticas às dos não-alinhados, inclusive quanto ao espaçamento entre os dois rebites utilizados.

(a)

(b)

Figura 3.8 Croqui (a) e foto (b) de um corpo de prova Glare-Glare com 2 rebites horizontais, ou não-alinhados em relação à direção de carregamento em fadiga. Observe a colagem de end tabs nas extremidades do espécime de modo a garantir a sua simetria longitudinal (para um carregamento essencialmente em tração), um maior poder de agarramento e uma resistência mínima à compressão exercida pelas garras hidráulicas do sistema de ensaio.

Observe na Figura 3.8b a colagem de *end tabs* nas extremidades do corpo de prova de modo a garantir sua simetria longitudinal do mesmo e, conseqüentemente um carregamento essencialmente trativo, ou seja, minimizando o desenvolvimento de momentos fletores.

A Figura 3.9 fornece a nomenclatura adotada para as chapas, lâminas e as partes dos prendedores (rebites) que compõem os conjuntos rebitados ensaiados destrutiva e não-destrutivamente, no presente estudo. Cabe destacar nesta figura que as lâminas metálicas denominadas 2 e 3 (*faying surfaces*), respectivamente, são aquelas em que essencialmente se desenvolvem os trincamentos durante os ensaios em fadiga, visto que elas operam em contato durante o carregamento mecânico cíclico, estando sujeitas, portanto, ao fenômeno de *fretting*, conforme amplamente ilustrado no Capítulo 2 deste texto.

A Figura 3.10 mostra uma metalografia e detalhes geométricos do rebite utilizado na confecção dos espécimes, em que se destacam a sua cabeça cônica e o rabo com ângulo reto de aprisionamento das chapas, respectivamente, escareada e não-escareada de Glare.

A Figura 3.11 ilustra as principais características da junta nas proximidades das furações em que se encaixam os rebites. Fica claro nesta figura que a cabeça cônica do rebite atinge praticamente 2/3 da espessura da chapa escareada, permanecendo íntegra praticamente apenas a lâmina metálica denominada 3 na Figura 3.11a. Nesta figura são identificadas as 2 chapas de Glare que compõem a junta, as lâminas metálicas individuais (vide Fig.3.11a) e as mantas de fibras de vidro que ocupam a posição central em cada uma das chapas do laminado híbrido metal-fibra. Na Figura 3.11b é mostrado um detalhe do perfil cônico do escareamento executado na chapa em que se encaixa a cabeça do rebite.

(a)

(b)

(c)

Figura 3.9 (a) Esquema com a terminologia empregada para as duas (2) chapas e quatro (4) lâminas metálicas que constituem uma junta rebitada simples sobreposta Gl-Gl. As lâminas de liga-Al numeradas 2 e 3 são aqui denominadas internas (à junta), e operam em íntimo contato durante o carregamento em fadiga, experimentando um movimento relativo repetido de baixa amplitude, que dá origem ao fenômeno de fretting. As lâminas 2 e 3 correspondem às chamadas faying surfaces. Já as lâminas numeradas 1 e 4 são denominadas externas (à junta); (b) Vista em corte da seção transversal de uma junta mostrando a cabeça cônica do rebite ajustada ao furo escareado; (d) Detalhe do rebite.

Figura 3.10 (a) Seção longitudinal do rebite de liga de alumínio de alta resistência classificação MS20426 AD 4-7; (b) Detalhe do perfil cônico do encaixe da cabeça do rebite na chapa escareada de Glare; (c) Detalhe do perfil reto de encaixe do rabo do rebite na chapa não-escareada de Glare.

Figura 3.11 (a) Corte da seção rebitada identificando-se todos os componentes da junta sobreposta; (b) Detalhe do perfil cônico do furo escareado numa das chapas de Glare.

4.1 Fadiga de amplitude constante de tensão

Os corpos de prova rebitados foram submetidos a um carregamento de amplitude constante de tensão. Empregou-se uma razão de carga (R =carga mínima/máxima) de 0,1, e uma frequência de carregamento de 10 Hz, as quais objetivaram evitar, respectivamente, a flambagem e o aquecimento dos corpos de prova rebitados ensaiados à temperatura ambiente. As cargas cíclicas aplicadas obedeceram a um formato de onda senoidal.

No presente estudo, diferentemente daqueles conduzidos anteriormente por FERNANDES et al (2004) e ^aTARPANI et al (2006), os quais culminaram invariavelmente na fratura completa dos corpos de prova fadigados, objetivou-se única e exclusivamente permitir o vasto trincamento interno dos corpos de prova, mais especificamente nas lâminas metálicas denominadas 2 e 3 na Figura 3.9a, porém sem nunca causar a ruptura catastrófica dos espécimes, e nem mesmo qualquer nível de trincamento externo (i.e., nas lâminas 1 e 4 das Figura 3.9a e 3.11a). Em outras palavras, evitou-se a todo o custo o desenvolvimento de danos (i.e., trincas) externos que pudessem ser visualmente detectáveis. Para isso, os níveis de tensão máxima aplicados aos corpos de prova restringiram-se a baixas tensões aplicadas, indicada anteriormente na Figura 2.5.

Utilizou-se nestes ensaios de fadiga um sistema servo-hidráulico MTS[®]-810 com capacidade máxima de 250 kN, mostrado na sequência de fotos que compõe a Figura 4.1.

(a)

(b)

(c)

Figura 4.1 (a) Sistema universal completo de ensaios mecânicos MTS-810; (b) Detalhe da estrutura de carregamento, (c) Corpo de prova rebitado durante ensaio de fadiga.

4.2 Inspeção por raios-X

Periodicamente, ao longo dos ensaios de fadiga, os corpos de prova rebitados de Glare foram retirados da máquina de ensaios mecânicos e submetidos à inspeção não-destrutiva, utilizando-se para isso as técnicas de radiografia de raios-X nas modalidades convencional, empregando-se filmes ou películas radiográficas, e digital, neste caso

fazendo uso das chamadas placas de imagem (*IP-imaging plate*). Visou-se basicamente detectar e identificar as possíveis descontinuidades internas tipo-trinca geradas no carregamento mecânico cíclico previamente aplicado.

Merece ser enfatizado que todo o procedimento de inspeção dos espécimes fadigados, incluindo a seleção de fontes e demais equipamentos, as variáveis de processo, normas utilizadas e padrões de referência adotada, além da própria interpretação das imagens obtidas, esteve integralmente sob controle das empresas e universidade que possuíam os equipamentos de raios-X. Neste sentido, cada um dos participantes do programa realizou suas tarefas de modo totalmente independente, sem qualquer interferência por parte do moderador (orientador do candidato), o qual foi encarregado dos ensaios de fadiga, da coordenação do projeto, da análise global e da redação do relatório final. Esta estratégia visou basicamente evitarem-se quebras de sigilo comercial-industrial, bem como quaisquer influências e pressões que pudessem culminar em tendências, favorecimentos, prejuízos e pr(é)conceitos, de qualquer natureza, por parte dos diversos participantes deste programa.

Algumas informações colhidas com as empresas, relativamente às condições em que foram conduzidos os experimentos, são fornecidas na seqüência. Porém, há de se mencionar que, à exceção daqueles realizados na Universidade Federal de Pernambuco, elas são bem escassas, ou mesmo inexistentes. Merece ser lembrado que os dois outros participantes deste estudo comparativo são empresas privadas, e temem, portanto, a divulgação de seus “segredos industriais”, visto haver uma concorrência acirrada no Brasil no tema em questão, a qual certamente tenderá a intensificar-se na medida em que radiografia digital ou computadorizada for sendo mais adotada no país.

4.2.1 Empresa Compoende

A Compoende Aeronáutica Ltda, em sua planta situada em Tremembé-SP, realizou somente ensaios de radiografia convencional, seja em corpos de prova completamente rompidos, de modo a “calibrar” o processo radiográfico visando a obtenção de imagens de máxima definição dos trincamentos (vide anexo 1, item A1.1), seja nos corpos de prova com trincamento exclusivamente interno, tal como documentados no corpo de texto principal (Capítulo 5).

Nestes ensaios foram adotadas as diretrizes estabelecidas na norma ASTM-E1742 (1999) e empregados filmes radiográficos de prata Classe I. O equipamento fonte de raios-X, as variáveis de processo, e a distância fonte-filme não foram divulgados pela empresa.

4.2.2 Empresa X

A empresa X, situada no interior do Estado de São Paulo, realizou ensaios de radiografia convencional somente em espécimes já fraturados (vide anexo 1, item A1.2) para fins de determinação das condições ideais de incidência do feixe de radiação, do tempo de exposição, da distância fonte-junta, etc, tal e qual foi também executado pela empresa Compoende (vide anexo 1, item A1.1). Estas condições assumidas como ideais foram posteriormente aplicadas à modalidade radiográfica digital com tempo próximo ou indireto, em que corpos de prova aparentemente íntegros foram inspecionados.

Utilizou-se uma fonte de raio-X Seifert, modelo C60, operando sob uma voltagem de 40 kV, amperagem de 0,5 mA, mantendo-se uma distância foco-filme de 600 mm, com o feixe incidindo perpendicularmente ao plano principal da junta, identicamente como realizado pela empresa Compoende. Foram empregados filmes radiográficos de prata Classe I nas radiografias tradicionais, enquanto que placas de compostos de fósforos (IP – *imaging plate*) foram sensibilizadas nos ensaios de radiografia digital. Nesta última modalidade, utilizou-se um *scanner* DenOptix QST da empresa italiana GendeX, especificamente desenvolvido para aplicações odontológicas e que foi adaptado pela empresa X para condições de uso industrial, notoriamente para o exame de plantas petroquímicas. A Figura 4.2 mostra este equipamento, acoplado a um computador pessoal, que varre com luz de *laser* a placa de fósforo sensibilizada previamente pelos raios-X.

A Figura 4.3 mostra imagens de radiografia digital, tipicamente obtidas por intermédio deste equipamento. Após processamento e tratamento de imagens em um editor de imagens VixWin[®] são possíveis 4 tipos básicos de imagens, conforme mostrados na sequência. As imagens possuem definição entre 300 e 600 DPIs, este último valor se aproximando à um filme convencional Classe II (ASTM).

(a)

(b)

(c)

Figura 4.2 (a) Scanner DenOptix QST da Gendex utilizado para radiografia digital pela empresa X. (<http://www.gendex-dental.com/>); (b) Equipamento completo; (c) Placa de imagem sensibilizada por radiação sendo carregada para leitura por feixe de laser.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.3 Tipos de imagens obtidas por raios-X digital de juntas rebitadas após re-edição em programas tipo Adobe® e Coreldraw®: (a) Padrão, (b) Tons invertidos correspondentes, (c) Em alto relevo ou tri-dimensional (3-D), (d) Tons invertidos correspondente.

4.2.3 Universidade Federal de Pernambuco

O sistema radiográfico utilizado pela UFPE consiste de uma placa de imagens de compostos de fósforo, segundo o responsável pelo equipamento possuindo “altíssima resolução, com tamanho de pixel de 50 μm ”, do tipo azul, um *scanner a laser* modelo Cyclone da Perkin-Elmer calibrado para uma resolução de 16 bits, e uma fonte portátil de raios-X de 270 kVp de potência modelo XRS-3 da Goldeng Engineering. Foi mantida uma distância de 600 mm entre a fonte de raios-X e as amostras, estas sempre em contato imediato com a placa de imagens. Posto que a resolução final das imagens capturadas depende fundamentalmente da dimensão da fonte, da distância da fonte ao objeto, do tipo da placa, do tempo de exposição, somente este último parâmetro pode ser variado. O detector ou sensor IP (*Imaging Plate*), embora seja extremamente sensível e interessante do ponto de proteção radiológica comparativamente aos filmes radiográficos, ainda possui resolução bem inferior a estes últimos. Nas melhores condições, assume-se que o sistema radiográfico digital em questão seja sensível o suficiente para detecção de trincas com abertura superior a 50 microns (visto ser esta a resolução nominal da IP, o que pode ser interpretado como o tamanho dos pixels correspondentes), enquanto que as películas radiográficas mais sensíveis para aplicação industrial (e.g., Classe 1) possam, em princípio, capturar fissuras com abertura tão estreitas quanto 12 microns. Segundo os operadores do referido sistema, de modo a intensificar a resolução da IP, melhorar a capacidade de detecção dos defeitos e distinguir mais clara e precisamente as trincas presentes nas juntas rebitadas, os espécimes rebitados foram rotacionados entre +45° e -45° com relação ao feixe incidente de radiação ionizante. As imagens radiográficas digitais foram posteriormente processadas com filtro Emboss tri-dimensional (3-D) visando intensificar o contraste.

A Figura 4.4 apresenta a maior parte dos equipamentos empregados nos experimentos, enquanto que a Fig.4.5 ilustra o procedimento adotado na aquisição de imagens digitais.

(a)

(b)

Figura 4.4 (a) Experimento de radiografia digital em pleno andamento na UFPE; (b) Sistema computadorizado de leitura óptica-fotônica das placas sensibilizadas de compostos de fósforo (<http://las.perkinelmer.com/search/Search.htm?Ntt=cyclone>).

Figura 4.5 Procedimento de rotação dos espécimes rebitados tal como adotado nas inspeções radiográficas conduzidas na UFPE.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CAPÍTULO

5

5.1 Fadiga de amplitude constante de tensão

Na Figura 2.5 podem ser identificados os pontos de dados de curvas S-N (tensão-vida) obtidos durante o presente estudo. À exceção do espécime denominado CDP111 (vide Tabela 5.1), todos os outros falharam com um número de ciclos muito superior ao limite de 1 milhão estabelecido. Estes dados correspondem aos pontos vinculados a setas na Figura 2.5.

A Tabela 5.1 identifica os corpos de prova ensaiados em fadiga, especificando-se o pico de carga máxima atingida no carregamento cíclico, a correspondente tensão nominal, bem como o número total de ciclos alcançados para introduzir os danos internos (i.e., essencialmente trincas nas lâminas metálicas internas das juntas rebitadas), os quais foram posteriormente detectados e caracterizados por técnicas de raios-X.

Tabela 5.1 *Dados de ensaio das quatro (4) principais juntas rebitadas ensaiadas em fadiga sob amplitude constante de tensão.*

CDP	Pico de Carga Máxima (kN)	Pico de Tensão Máxima Aplicada (MPa)	Número Total de Ciclos de Fadiga
19 (Não alinhado)	3,00	42	2.297.900
29 (Alinhado)	3,00	42	7.724.352
111 (Não Alinhado)	3,50	49	1.929.990
211 (Alinhado)	3,50	49	1.929.000
210 (Alinhado)	3,50	49	1.791.119
23 (Alinhado)	4,00	56	465.632
13 (Não Alinhado)	4,00	56	520.000

As Figuras 5.1 a 5.4 mostram as vistas frontal (cabeça do rebite) e traseira (rabo do rebite), de acordo com as referências previamente estabelecidas na Figura 3.6, de todas as juntas rebitadas listadas na Tabela 5.1.

O objetivo destas fotos é, basicamente, confirmar que após a aplicação do número de ciclos indicados na Tabela 5.1 nenhum trincamento externo foi desenvolvido nas chapas rebitadas. Conseqüentemente, nenhum dano impingido às juntas fadigadas poderia ser detectado por pura inspeção visual, conforme planejado inicialmente neste programa de exame não-destrutivo.

Merece ser mencionado que, embora as chapas rebitadas se mostrem externamente íntegras, pelo menos uma das cabeças de rebite de cada uma das juntas foi danificada, o que evidência a presença de descontinuidades internas no material. No entanto, tal fato não constitui, em princípio, qualquer impedimento para a análise não-destrutiva dos corpos de prova, visto que estes danos externos, e, portanto, visíveis, restringem-se somente a cabeça dos prendedores.

A Figura 5.5 apresenta um padrão típico de trincamento desenvolvido nas lâminas internas (*faying surfaces*) das chapas rebitadas de Glare, tal como documentado a partir de um corpo de prova ensaiado em um programa preliminar sob níveis de tensão baixos, i.e., baixas tensões aplicadas.

Estes trincamentos internos são exatamente aqueles que se buscam revelar por intermédio de inspeção não-destrutiva por raios-X.

(a)

(b)

Figura 5.1 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD19 após a aplicação de 2.297.900 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,0 kN.

(a)

(b)

Figura 5.2 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD29 após a aplicação de 7.724.352 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,0 kN.

(a)

(b)

Figura 5.3 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD111 após a aplicação de 1.169.000 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,5 kN.

(a)

(b)

Figura 5.4 Vistas frontal (a) e traseira (b) do CPD211 após a aplicação de 1.929.990 ciclos de fadiga com pico de carga de 3,5 kN.

Figura 5.5 Exemplos de trincas de fadiga desenvolvidas nas lâminas metálicas internas de chapas rebitadas de Glare, desenvolvidas sob baixas tensões aplicadas (FERNANDES et al, 2004). Note que a fratura da cabeça dos rebites é subsequente à evolução do trincamento por longas extensões.

5.2 Inspeção por raios-X

5.2.1 Empresa Compoende

A Figura 5.6 apresenta as imagens radiográficas obtidas por raios-X na modalidade convencional (utilizando filmes ou películas fotográficas - vide item 4.2.1), em modos positivo e negativo, respectivamente, dos 4 espécimes rebitados e fadigados (2 verticais e 2 horizontais) listados na Tabela 5.1 e fotografados nas Figuras 5.1 a 5.4.

Figura 5.6 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para 4 corpos de prova (CDP) previamente fadigados até determinado número N de ciclos: São fornecidas as imagens originais (positivos) e, correspondentemente, em tons invertidos (negativos): (a & a') CDP19, $N=2.297.900$; (b & b') CPD29, $N=7.724.352$; (c & c') CPD111, $N=1.169.000$; (d & d') CPD211, $N=1.929.990$. As setas apontam para os trincamentos detectados pela técnica em questão.

Nota-se que os padrões de trincamento das duas geometrias de juntas são bem característicos e fortemente dependentes da disposição dos rebites.

Observam-se claramente trincas duplas emanando de cada uma das furações de rebite no caso das juntas verticais, ou alinhadas à direção de carregamento mecânico (Fig.5.6b&d). Nota-se que a técnica de raios-X empregada não possibilita, entretanto, identificar em qual(is) das lâminas internas das chapas de Glare (nominadas 2 e 3 na Fig.3.7a) se iniciam e evoluem os trincamentos. De fato, análises de falha dos corpos de prova similares (^aTARPANI et al, 2006; FERNANDES et al, 2004) demonstraram que os trincamentos identificados nesta geometria de corpo de prova não ocorrem numa mesma chapa de Glare, como se poderia até supor através da observação exclusiva das radiografias, porém se desenvolvem separadamente em uma e em outra das chapas unidas por rebites, mais exatamente nas respectivas *faying surfaces* metálicas (Fig.5.7). Esta não discriminação do local exato de ocorrência do trincamento é uma limitação considerável da técnica de raios-X, se comparada, por exemplo, à de correntes parasitas (^cTARPANI & SOARES, 2007). Muito provavelmente, a modalidade de radiografia computadorizada de raios-X possa superar tal importante limitação.

Figura 5.7. Padrão de trincamento duplo das lâminas metálicas (*faying surfaces*) das chapas de Glare rebitadas segundo o arranjo vertical, ou alinhado, medias tensões de carregamento. Note que medias tensões indica o que provavelmente ocorra no estágio III, numa taxa mais lenta de progressão dos danos. Setas vermelhas apontam para os 4 (i.e., dois pares) sítios de nucleação.

No caso das juntas horizontais, ou não-alinhadas (a&c), esta limitação inerente à técnica de raios-X empregada no presente estudo, qual seja, a de não permitir identificar em qual(is) das lâminas internas das chapas de Glare (nominadas 2 e 3 na Fig.3.7a) iniciam e evoluem os trincamentos, leva ao questionamento de qual é o número de trincas de fadiga (1, 2, 3 ou mesmo 4) que nucleiam e evoluem em uma mesma chapa de Glare (i.e., numa

mesma lâmina metálica interna à junta), a partir de uma dada furação. Entretanto, novamente com base na análise de falha de espécimes similares (^aTARPANI et al, 2006; FERNANDEZ et al, 2004), pode-se garantir que este número de trincas é sempre 2, i.e., trincamento duplo identicamente ao caso das juntas não-alinhadas (Fig.5.5). O fato é que o trincamento simultâneo das lâminas 2 e 3, cria a falsa impressão, tendo-se apenas as radiografias como referência, que até 4 trincas poderiam emanar de uma mesma furação e em uma mesma lâmina metálica que compõem a chapa de Glare. A Figura 5.8 fornece subsídios suficientes para esclarecer definitivamente este ponto.

Figura 5.8. (a) Padrão de trincamento quádruplo das lâminas metálicas (*faying surfaces*) das chapas de Glare rebitadas segundo o arranjo horizontal, ou não-alinhado, no regime de medias tensões de carregamento. Repare que à medias tensões aplicadas, indica que provavelmente ocorra no estágio III, numa taxa mais lenta de progressão dos danos. Setas vermelhas apontam para os 8 (i.e., quatro pares) sítios de nucleação; (b,c) Vista detalhada de um típico trincamento duplo emanando de um único furo de rebite em uma lamina metálica (*faying surface*) de Glare.

Merece ser destacado, ainda com relação a este assunto, que a eventual interação entre duas trincas caminhando numa mesma direção, em uma mesma lâmina metálica interna à junta, porém em sentidos opostos (visto terem se originado em furações distintas), ocorrência possível somente no caso das juntas com rebites horizontais (i.e., não-alinhados à direção de carregamento, casos a&c), constitui, muito provavelmente, na principal razão para que este arranjo de rebites exiba uma menor resistência à fadiga comparativamente às juntas com rebites alinhados, para uma mesma tensão aplicada, conforme bem demonstram tanto a Figura 2.5 como a Tabela 5.1. De fato, as Figs.5.6a e 5.6c revelam exatamente esta interação entre trincas que progridem umas contrariamente às outras na região central do espécime, i.e., entre os rebites não-alinhados, acelerando, desta forma, a taxa de trincamento efetivo do espécime.

Em certa extensão, isto está diretamente associado aos fenômenos conhecidos na literatura científica por “danos em sítios múltiplos” (*multiple site damage*), e “danos difundidos de fadiga” (*widespread fatigue damage*), respectivamente, que se desenvolvem nas estruturas aeronáuticas rebitadas, quando a presença de concentradores de tensão (rebites), favoravelmente dispostos entre si e com relação ao sistema de carregamento cíclico ou em fadiga, facilita tanto a nucleação de defeitos tipo-trinca quanto a sua interação, segundo uma mecânica de fratura muito mais complexa que aquela que governa corpos contendo uma única e simples trinca submetidos à tração. Conforme já visto no item 1.1, um evento que demonstrou o deletério sinergismo resultante da presença de múltiplos concentradores de tensão em uma dada estrutura submetida à fadiga foi o da Aeronave Airbus 737 da Aloha Airlines, quando uma trinca gigante se desenvolveu pela união instantânea de trincas nucleadas e crescidas devido aos ciclos de pressurização/despressurização, levando à fratura catastrófica de parte da fuselagem do aeronave.

5.2.2 Empresa X

As Figuras 5.9 a 5.12 apresentam as radiografias digitais dos quatro (4) espécimes listados na Tabela 5.1, obtidas por intermédio de sensibilização de placas de fósforo, através do método do tempo próximo ou indireto, empregando-se equipamento originalmente destinado a aplicação odontológica e adaptado ao uso industrial (vide item

4.2.2). Para cada corpo de prova fadigado são fornecidos quatro (4) modalidades de imagens, tal como anteriormente especificadas na Figura 4.3.

Tendo-se em mente os resultados anteriormente apresentados na Fig.5.6, pode-se concluir pelo completo fracasso deste procedimento na detecção de trincamento internos em quaisquer dos espécimes previamente fadigados.

Coincidentemente, ou não, a empresa X optou por permanecer no anonimato.

Figura 5.9 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP19, $N=2.297.900$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.

Figura 5.10 Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP29, $N=7.724.352$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.

Figura 5.11 *Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP111, $N=1.169.000$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.*

Figura 5.12 *Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP211, $N=1.929.990$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.*

5.2.3 Universidade Federal de Pernambuco

As Figuras 5.13 a 5.16 apresentam as radiografias digitais dos quatro (4) espécimes listados na Tabela 5.1, obtidas por intermédio de sensibilização de placas de fósforo, através do método do tempo próximo ou indireto, empregando-se equipamento especificamente destinado às práticas industriais (vide item 4.2.3). Novamente, para cada corpo de prova fadigado, são fornecidos quatro (4) modalidades de imagens, tal como anteriormente especificadas na Figura 4.3.

Diferentemente dos outros procedimentos realizados neste programa, nos quais o feixe incidente de raios-X foi mantido ortogonal (90°) ao plano principal do espécime, um feixe de radiação inclinado a 45° foi aplicado, penetrando indistintamente pelas faces 1, 2, 3 ou 4 (vide Figuras 3.9 e 4.5), de maneira a intensificar os sinais decorrentes do trincamento, segundo justificativa do operador do equipamento.

Nota-se que as imagens dos espécimes 19 e 29 (Figs.5.13 e 5.14, respectivamente) são particularmente pobres em proverem informações a respeito da presença de trincas. A bem da verdade, às expensas do esforço do observador, poucas das descontinuidades podem ser identificadas. A modalidade de foto em alto relevo prejudica ainda mais, nestes dois casos, a revelação dos defeitos, ou seja, trincas. Ao leitor, é sugerida a apreciação das imagens em maior ampliação fornecidas no Anexo 2.

Quanto aos corpos de prova 111 e 211 (Figs.5.15 e 5.16, respectivamente), já é possível uma melhor visualização, embora ainda que parcial, dos danos internos à junta e gerados por fadiga. Certamente, há de se tomar como base as imagens fornecidas anteriormente na Fig.5.6, as quais foram assumidas como referencia no presente estudo, de modo a se certificar de que algumas das sutis indicações e detalhes nas Figs.5.15 e 5.16 correspondem realmente a descontinuidades (trinca).

De particular interesse é o CDP211 (Fig.5.16), quando um dos pares de trincamento, emanando a partir de uma das furações de rebite, é muito bem delineado nas proximidades do furo, embora as trincas se tornem praticamente invisíveis já a cerca de meio caminho na direção das bordas da amostra. Estranhamente, as trincas nucleadas e crescidas a partir da furação superior não são reveladas nestas radiografias digitais¹, já que, em princípio, e segundo mostram as Figs.5.6d e 5.6d', elas são praticamente imagens espectrais das trincas vinculadas à furação inferior.

¹ A rigor, um leve trincamento pode ser observado, tal como indicado por círculos tracejados naquela figura. No entanto, para fins práticos, há de se considerar que as imagens de trincas são muito tênues e podem facilmente passar despercebidas mesmo pelo observador mais atento.

Nota-se ainda na Figura 5.16 que existe um considerável deslocamento entre as imagens das trincas relativamente aos respectivos furos de rebite, compondo assim os chamados efeitos fotográficos de fantasmas e sombras, acompanhados por distorções geométricas projetadas.

Estes efeitos criados artificialmente são característicos dos procedimentos de intensificação de imagens, e podem ter sido acentuados pelo ângulo inclinado de incidência do feixe de radiação na face do espécime, o qual foi adotado de modo a “alargar” a abertura da trinca à passagem dos raios-X. De fato, observa-se que o deslocamento entre imagens de trincas e respectivas furações está diretamente relacionado ao ângulo de incidência do feixe de raios-X com relação ao plano principal da junta rebitada. No caso em questão, foram adotados dois ângulos, de respectivamente $+45^\circ$ e -45° , para a obtenção das imagens digitais. Conforme anteriormente mencionado, a justificativa do responsável pelas radiografias para um ângulo de ataque inclinado à face da amostra foi a de que, sob estas condições, revelaram-se trincas que não haviam sido anteriormente detectadas para um ângulo convencional de incidência de feixe de 0° , tal como tipicamente adotado, por exemplo, nas radiografias convencionais em filmes/películas. Esta “descoberta” foi empiricamente realizada pelo operador do equipamento, após seqüências de tentativas-e-erros, e pode muito bem estar relacionada à fratura tipicamente inclinada (*slant* a 45°) desenvolvida em chapas ou lâminas finas de liga de alumínio carregadas em tração (modo misto de fratura I/III) como decorrência da predominância de um estado plano de tensão (BRON et al, 2004).

Em alguma extensão, este fato está vinculado ao limite real de detecção do sistema radiográfico empregado, o qual estaria acima daquele minimamente requerido para a indicação de todas as trincas realmente presentes nos espécimes, que são exatamente aquelas indicadas por radiografia de filmes, mostradas na Fig.5.6. Visto que a placa sensora de imagens (IP) utilizada pela UFPE tem um limite máximo de definição da ordem de 50 microns (alcançado sob condições consideradas ideais), enquanto que filmes ou películas radiográficas Classes I e II tradicionais podem chegar aos 12 microns, pode-se argüir que esta seja a principal razão para as notáveis discrepâncias de resultados obtidos entre as duas técnicas radiográficas. Em outras palavras, a não-detecção de algumas trincas pela

modalidade computadorizada é atribuída ao fato de a sua abertura ser inferior ao limite de resolução, ou tamanho do pixel da tela sensora, de 50 μm . Aberturas de trincas dos espécimes em repouso foram monitoradas pelos pesquisadores da UFPE por intermédio de microscópios ópticos. Segundo os mesmos: “Nas melhores condições, detectaríamos trincas superiores a 50 micra (sic)...”.

Cabe também lembrar que, nestes processos digitais intrinsecamente baseados em intensificação de imagens, a ocorrência de distorções geométricas projetadas e demais artefatos pode ser também parcialmente creditada à distância existente entre a área de interesse no objeto radiografado e a placa de fósforo (conforme destacado anteriormente no item 2.3.3).

Além disso, ao longo da espessura da amostra avaliada existe naturalmente uma diferença de altura entre os diversos detalhes construtivos e/ou defeitos introduzidos, e, portanto, passíveis de revelação durante o exame radiográfico.

Por exemplo, no caso das juntas rebitadas, a cabeça e o rabo dos rebites, as furações e os trincamentos nelas iniciados pertencem a planos distintos, de sorte que os efeitos de deslocamento entre imagens claramente observados na Fig.5.16, relativa ao CDP211, são intrínsecos ao procedimento de se adotar um ângulo não-perpendicular de incidência do feixe de raios-X.

A Fig.5.16 é, de fato, o melhor exemplo ilustrativo deste estudo quanto ao efeito do ângulo de incidência do feixe de radiação no deslocamento entre as imagens das trincas e das respectivas furações. Note nas Figs.5.16(a, b,e,f) que as trincas estão posicionadas abaixo da furação inferior da junta enquanto que as trincas se localizam acima da furação nas Figs.5.16(c,d,g,h).

Nas Figs.5.15(e,f) e 5.15(g,h) pode-se também observar esta inversão de posicionamento entre as trincas e a respectiva furação, desta feita para o CDP111. O mesmo é verificado para o CDP19, quando se comparam as Figs. 5.13(a,b) e 5.13(c,d).

Figura 5.13 *Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP19, $N=2.297.900$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .*

Figura 5.14 *Imagens radiográficas (equipamento industrial) obtidas para o CDP29, N=7.724.352: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .*

Figura 5.15 Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP111, $N=1.169.000$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .

Figura 5.16 *Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP211, N=1.929.990: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de +45°; (b) Tom invertido correspondente a +45°; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45°; (d) Tom invertido correspondente a -45°; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de +45°; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a +45°; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45°; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45°.*

CONCLUSÕES

A realização do presente estudo visando estimar a capacidade de duas modalidades da técnica de inspeção não-destrutiva por raios-X, quais sejam, convencional, por intermédio de filmes, e digital ou computadorizada, empregando placas de imagem, na detecção e identificação de trincas de fadiga em juntas rebitadas sobrepostas de laminado híbrido metal-fibra (LMF) Glare, permitiu se chegar às seguintes conclusões:

1. A radiografia de raios-X utilizando-se filmes ou películas tradicionais possibilita a clara identificação e delineamento das trincas de fadiga, tais como corroboradas por análise de falhas;
2. Mesmo produzindo imagens de alta resolução, raios-X convencionais não possibilitam identificar em qual(is) das lâminas internas das chapas de Glare se iniciam e evoluem os trincamentos;
3. Equipamentos industriais de radiografia digital poderão se tornar potencialmente úteis à inspeção de juntas de Glare somente após uma melhora significativa da capacidade de resolução das placas sensoras de imagem;
4. A despeito de uma melhora na capacidade de detecção de trincamento interno às juntas, a adoção de feixes inclinados de raios-X na modalidade de radiografia digital cria alterações indesejáveis na imagem, tais como distorções, deslocamentos, fantasmas, sombras ou penumbras, os quais podem prejudicar significativamente, chegando mesmo a impedir a tarefa de monitoração da integridade estrutural desta classe de componentes;

5. Os sistemas digitais comerciais, usados para uso industrial, são, muito provavelmente, inadequados à tarefa em questão;
6. São ainda necessários novos testes, bem como eventuais desenvolvimentos, em especial na modalidade de radiografia digital, no sentido de assegurar que as técnicas presentemente avaliadas sejam capazes de detectar trincamentos incipientes, da ordem de fração de milímetros, de forma a se qualificarem como ferramentas verdadeiramente úteis para garantia de segurança de aeronaves em vôo que utilizem laminados híbridos metal-fibra mecanicamente unidos por rebites.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

CAPÍTULO

7

Com base nos resultados obtidos neste estudo, os seguintes trabalhos complementares e suplementares são fortemente sugeridos:

1. Continuidade dos estudos em radiografia digital, de modo a aprimorar a técnica para aplicação aeronáutica, utilizando-se placas de imagem com maior resolução, IQIs (penetrômetros), diferentes fontes (raios-x e gama, estes últimos oriundos de radioisótopos), novas distâncias fonte-objeto e objeto-placa de imagem, dentre outras variáveis;
2. Estudar em maior detalhamento o efeito, na qualidade das radiografias digitais (placas de imagem), bem como convencionais (filmes), do ângulo de incidência do feixe de radiação em relação à face da junta rebitada;
3. Estudar em maior detalhamento o efeito, na qualidade das radiografias digitais, bem como convencionais, do sentido de incidência do feixe de radiação em relação às faces da junta rebitada (cabeça e rabo dos rebites);
4. Aplicar as diversas metodologias radiográficas em juntas mistas Glare-liga Al;
5. Verificar o potencial das diversas técnicas avaliadas na detecção de trincamento incipiente (iniciação de dano) e na monitoração de pequenas variações de comprimento de trinca no decorrer do ensaio de fadiga;

6. Evoluir para técnicas mais avançadas de radiografia direta (em tempo real) e tomografia computadorizada;
7. Comparar os resultados de radiografia aos de correntes parasitas e ultra-som.

PUBLICAÇÕES DERIVADAS DA DISSERTAÇÃO

CAPÍTULO

8

- TARPANI J.R., SOARES H.N. (2007) *Inspeção não-destrutiva e análise de falha de juntas fadigadas de Glare[®]*, Aceito para o 62º Congresso Anual Internacional da ABM, Vitória-ES, Brasil.
- TARPANI J.R., SOARES H.N. (2007) *Nondestructive inspection of fatigued lap joints of hybrid fiber-metal laminate Glare[™]*, Aceito para o 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Brasília-DF, Brasil.

BIBLIOGRAFIA

- ^aAHMED A.A., BAKUCKAS Jr. J.G., AWERBUCH J., LAU A.C., TAN T. (2006) *Fractographic examinations and analysis of crack nucleation and growth in a fuselage lap joint*, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress, Atlanta-GA, USA.
- ^bAHMED A.A., BAKUCKAS Jr. J.G., AWERBUCH J., LAU A.C., TAN T. (2006) *Experimental and analytical evaluation of multiple site damage development in fuselage lap joints*, In: Proceedings of the 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference, Atlanta-GA, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS (2001), Designation ASTM-E606-99, Standard practice for strain-controlled fatigue testing, American Society for Materials Testing Handbook, Philadelphia-PA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS (2006), Designation ASTM-E1742-06, Standard practice for radiographic examination, American Society for Materials Testing Handbook, Philadelphia-PA.
- ANDERL, T.R. (2002) *Lab develops detector, software to improve inspection*, news@afrl.
- ARMISTEAD A.R., STANLEY J.H. (1997) *Computed tomography: a versatile technology*, Advanced Materials & Processes, v.44, p.33-36.
- ASKELAND D. R. (1994) *The Science and Engineering of Materials*, PWS Publishing Company, 3rd Edition.
- ASUNDI A., ALTA, Y N. (1997) *Fiber Metal: An Advanced Material for Future Aircraft*, Journal of Materials Processing Technology, v.63, p.384-394.
- ATRE A.P., JOHNSON W.S. (2006) *Analysis of the effects of riveting process parameters on the fatigue of aircraft fuselage lap joints*, In: Proceedings of the 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference, Atlanta-GA, USA.

- BASTIAN F.L. (2003) *Compósitos laminados fibra-metal: características e tenacidade à fratura*, In: Anais do 58º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- BAVENDIEK K, HEIKE U., MEADE W.D., ZSCHERPEL U., EWERT U (2006) *New digital radiography procedure exceeds film sensitivity considerably in aerospace applications*, In: Proceedings of the European Conference on Non Destructive Testing, Berlin, Germany.
- BEUMLER T. (2006) *Fiber metal laminates- a family concept*, In: Proceedings of the 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference, Atlanta-GA, USA.
- BOCKAERT V (2006) *Pixel Quality*, http://www.dpreview.com/learn/?/key=Pixel_Quality.
- BOWMAN R.D., BENNETT B.A., STEVENSON M.E. (2003) *Radiographic inspection in failure investigations*, Practical Failure Analysis, v.3, p.73-77.
- BLAKELEY B. (2004) *Digital radiography - is it for you?*, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, v.46, n.7, p.403-408.
- BRAY D.E. (2000) *Historical review of technology development in NDE*, In: 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy.
- BRON F., BESSON J., PINEAU A. (2004) *Ductile rupture in thin sheets of two grades of 2024 aluminum alloy*, Materials Science and Engineering A, v.380, p.356–364.
- CAPRIOTTI R., DATI E., SILVESTRI P., TRIVISONNO G., MARINETTI S., DAL TOE S., BISON P.G., GRINZATO E. (2000) *NDT techniques for the evaluation of impact damage on aeronautical structures*, In: Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy.
- CARTZ L. (1996) *Nondestructive testing*, The Materials Information Society – American Society for Materials International, Metals Park, OH, USA.
- COLE H. (2005) *RSNA 2005 R-X radiography report*, http://www.kcare.co.uk/Ourwork/RNSA_2005_REPORT.pdf.
- DE RIJCK J.J.M. (2005) *Stress analysis of fatigue cracks in mechanically fastened joints*, PhD Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University, The Netherlands, 316 pg.
- DIAMOND A. (2006) *Stationary and portable use of a Si-flat panels in NDT industries*, In: Proceedings of the European Conference on Non Destructive Testing, Berlin, Germany.

- FAHR A., CHAPMAN C.E., LALIBERTÉ J.F., FORSYTH D.S., POON C. (2000) *Nondestructive evaluation methods for damage assessment in fiber-metal laminates*, Polymer Composites, v.21, p.568-574.
- FERNANDES G., BOSE W.W., TARPANI J.R. (2004) Fadiga em juntas rebitadas de material composto Glare, In: Anais do 59º Congresso Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo-SP, Brasil.
- GODOI W.C. (2005) *Detecção de defeitos em isoladores poliméricos por radiografia digital*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 80 pg.
- GREEN Jr. R.E. (2000) *Advances in non-destructive materials characterization*, In: Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy.
- GUNNINK J. W., VLOT A., VRIES T. J. (2002) *Glare Technology Development 1997-2000*, Applied Composites Materials, v. 54. p.201-219.
- HEIDA J.H., PLATENKAMP D.J. (2001) *In-service inspection of Glare fuselage structures*, National Aerospace Laboratory NLR-TP-2001-608 Report, The Netherlands.
- HEWITT J. (1998) *The work of the commercial aircraft composite repair committee - Inspection task group*, Insight, v.40, p.168-170.
- IYER K., HU S.J., BRITTMAN, F.L., WANG P.C., HAYDEN D.B., MARIN S.P. (2005) *Fatigue of single- and double-rivet self-piercing riveted lap joints*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v.28, p.1-11.
- ^aJOSE J.C.V, MILANI H.S.B., PAES E.A.O., HEIN J.H.O., SERRA F.A.S., RABELLO J.M.B. (2003) *Inspeção de juntas soldadas através de radiografia computadorizada como ferramenta de avaliação de engenharia*, In: Proceedings of the 3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- ^bJOSE J.C.V, MILANI H.S.B., PAES E.A.O., BOITA M., SOUZA L., SERRA F.A.S., (2003) *Vantagens obtidas em radioproteção quando do uso do ensaio de radiografia computadorizada – RC (digital) em plantas de processos*, In: Proceedings of the 3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- JURY D., RAMAKRISHNAN R. (2006) *Fatigue crack arrays found in lap joint bays removed from a narrow body commercial aircraft*, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress (9IFC), Atlanta-GA, USA.

- ^aKUIJPERS P.L., HOOIJMEIJER P.A., VLOT A. (2003) *Repair of fibre metal laminates - riveted repairs on unstiffened and stiffened Glare panels*, fonte desconhecida.
- ^bKUIJPERS P.L. (2002) *Fatigue behavior of repair patches of Glare*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v.34, p.445-451.
- LAZZERI L. (2001) *Fatigue behavior of riveted Glare lap joints*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v.24, p.579-589.
- NEWMAN JR.J.C., STEADMAN D., RAMAKRISHNAN R. (2006) *Fatigue crack growth analyses of cracks in riveted lap joints of a narrow-body aircraft*, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress (9IFC), Atlanta-GA, USA.
- NUKAGA J., KAMIMURA H. (2006) *Hitachi 450keV X-ray computed tomography system*, In: Proceedings of the European Conference on Non Destructive Testing, Berlin, Germany.
- PARDIKAR R.J. (2006) *Digital Radiography for Enhancing the Quality and Productivity of Weldments in Boiler Components*, In: Proceedings of the 3rd National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Hyderabad, India, paper TP-118.
- PIOTROWSKI D., BOHLER J, BODE M, MOORE D, BAKUCKAS J, GALELLA D, SWINDELL P. (2006) *Assessment of capabilities and readiness of conventional and emerging NDI methods for detecting subsurface cracks in lap joint structures*, In: Proceedings of the 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference, Atlanta-GA, USA.
- RAVINDRAN V.R. (2006) *Digital Radiography Using Flat Panel Detector for the Non-Destructive Evaluation of Space Vehicle Components*, In: Proceedings of the 3rd National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Hyderabad, India, paper TP-97.
- ^aRAMAKRISHNAN R., STEADMAN D., CARTER A. (2006) *Crack growth history reconstruction of lap joint fatigue cracks*, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress (IFC9), Atlanta-GA, USA.
- ^bRAMAKRISHNAN R., JURY D. (2006) *Characterization of defects and damages in rivet holes in a crown lap joint of a commercial aircraft at design service goal*, In: Proceedings of the 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference, Atlanta-GA, USA.
- RANS C., STRAZNICKY (2005) *Avoiding knife-edge countersinks in Glare through dimpling*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v.28, p.633-640.

- ROEBROEKS, G.H.J.J. (2002) *Fiber-metal Laminates – Recent developments and applications*, fonte desconhecida.
- RYAN L., MONAGHAN J. (2000) *Failure mechanism of riveted joint in fibre metal laminates*, Journal of Materials Processing Technology, v.103, p.36-43.
- SEIDL A.L. (1994) *Inspection of composite structures - part I*, SAMPE Journal, v.30, p.38-44; (1995) *part II*, ibid, v.31, p.42-48.
- SHINOHARA A.H., ACIOLI E., KHOURY H.J. (2002) *Avaliação da técnica de radiografia digital em gamagrafia*, In: Anais da Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ 6), Salvador-BA, Brasil.
- SILVA L.M., GONÇALVES J.P., OLIVEIRA F.M.F., DE CASTRO P.M.S.T. (1999) *Multiple Site Damage in Riveted Lap-Joint specimens*, fonte desconhecida.
- SMITH G.M. (1996) *Nondestructive evaluation of large composite components*, Materials World, v.32, p.203-206.
- SZOLWINSKI M.P., FARRIS T. N. (1999) *Linking riveting process parameters to the fatigue performance of riveted aircraft structures*, Journal of American Institute of Aeronautics & Astronautics (AIAA), v.44, p.1208-1218.
- ^aTARPANI J.R., MILAN M.T., BOSE W.W., SPINELLI D. (2006), *Fatigue in riveted lap joints of fiber-metal laminate Glare-5*, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress (IFC9), Atlanta-GA, USA.
- ^bTARPANI J.R., MILAN M.T., BOSE W.W., SPINELLI D. (2006) *Low-to-medium cycle fatigue life of Glare-5 and aluminum alloy 2024-T3*, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress (IFC9), Atlanta-GA, USA.
- ^cTARPANI J.R., SOARES H.N. (2007) *Inspeção não-destrutiva e análise de falha de juntas fadigadas de Glare[®]*, Aceito para o 62º Congresso Anual Internacional da ABM, Vitória-ES, Brasil.
- TEAGLE P.R. (1983) *The quality Control and Non-Destructive of Composite Aerospace Components*, Composites, v.14, p.223-231.
- TOBER G., SCHILLER D. (2000) *NDT in aerospace – State of art*, In: Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy.
- VERMEEREN C.A.R.J., BEUMLER T., DE KANTER J.L.C.G., VAN DER JAGT O.C., OUT B.C.L. (2003) *Glare design aspects and philosophies*, Applied Composite Materials, v.10, p.257-276.

- VIDYASANKAR S. (2006) *Trends to consider in the Radiography Equipment Market*, Frost & Sullivan Market Insight, <http://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-print.pag?docid=68919988>.
- VLOT A., VOGELANG L.B., DE VRIES T.J. (2001) *Towards application of fiber-metal laminates in large aircraft*, <http://www.glareconference.com>.
- WOERDEN H. J. M., SINKE J., HOOIJMEIJER P. A. (2003) *Maintenance of Glare structures and Glare as riveted and bonded repair material*, Applied Composite Materials, v.10, p.307-329.
- www.google.com.br/search?hl=pt-BR&q=PREPRODUCTION+INITIATIVE-NELP+DIGITAL+RADIOGRAPHIC+SYSTEM+%28NONDESTRUCTIVE+INSPECTION+APPLICATION%29+&btnG=Pesquisa+Google&meta= - PREPRODUCTION INITIATIVE-NELP DIGITAL RADIOGRAPHIC SYSTEM, NONDESTRUCTIVE INSPECTION APPLICATION, FINAL REPORT NAS JRB FORT WORTH, TX.
- www.gehealthcare.com/inen/rad/xr/education/dig_xray_iq.html, IMAGE QUALITY PARAMETERS FOR DIGITAL DETECTOR GE EDUCATION ON X-RAY RADIOGRAPHY.
- www.ultrasonic.de/news/2005/20051101-1kodak.htm, KODAK INDUSTREX DIGITAL SYSTEMS NOW AVAILABLE TO INDUSTRIAL RADIOGRAPHERS.
- wwwxt.raytheon.com/scm/quality/files/TC-C_1.0.pdf, RADIOGRAPHIC EXAMINATION OF METALLIC & NON-METALLIC MATERIALS RAYTHEON.
- www2.robins.af.mil/ - DIGITAL RADIOGRAPHY & APPLICATIONS FOR AIRCRAFT MAINTENANCE, WARNER ROBINS AIR LOGISTICS CENTER.

ANEXO 1

O principal objetivo deste Anexo 1 é fornecer ao leitor os resultados dos programas preliminares de calibração de procedimentos de radiografia, na modalidade convencional (filmes ou películas) realizados pelas empresas envolvidas neste estudo, em que se utilizaram apenas partes (metades) de juntas previamente fadigadas até a fratura completa dos espécimes. Desta forma, pôde-se ter, facilmente, uma correlação direta entre as imagens radiográficas obtidas e as trincas visualmente observadas nas amostras já rompidas.

A1.1 Empresa Compoende

Figura A1.1 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP15 rompido após 72.500 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 5 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A1.2 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP24 rompido após 1.010.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A1.3 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP26 rompido após 145.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 5 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.

Note que a qualidade das radiografias é bem inferior aos casos A1.1 e A1.2, sinalizando o efeito (negativo) da incidência do feixe de radiação na face trincada do laminado Glare. Este aspecto não é aprofundado no presente trabalho.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura A1.4 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP212 rompido após 275.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4,5 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.

A1.2 Empresa X

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura A1.5 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP17 rompido após 329.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas.

Figura A1.6 *Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP24 rompido após 1.010.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas. Note que o sentido de entrada do feixe é inverso ao realizado na obtenção das imagens fornecidas na Figura A1.2. Novamente, a qualidade das radiografias parece ser positivamente afetada quando o feixe de radiação incide na face não-trincada do laminado Glare. Este aspecto não é aprofundado no presente trabalho.*

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura A1.7 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para o CDP212 rompido após 275.000 ciclos de fadiga, com pico de carga máxima de 4,5 kN e $R=0,1$: (a) Positivo; (b) Negativo; (c) Amostra radiografada; (d,e) Detalhe das trincas. Observe a correspondência entre as colorações de setas. Compare esta figura com a Fig.A1.4, e repare na melhor qualidade daquela sobre esta.

ANEXO 2

O principal objetivo deste Anexo 2 é prover o leitor com imagens radiográficas mais ampliadas, relativamente àquelas fornecidas no corpo principal do texto, permitindo assim dirimir qualquer dúvida quanto à presença, ou não, de trincamentos internos às juntas rebitadas de Glare, bem quanto à definição e qualidade geral das imagens.

A2.1 Empresa Compoende

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.1 Continua na próxima página.

(a')

(b')

(c')

(d')

Figura A2.1 Imagens radiográficas por filme (raios-X na modalidade convencional) obtidas para 4 corpos de prova (CDP) previamente fadigados até determinado número N de ciclos: São fornecidas as imagens originais (a-d) e, correspondentemente, em tons invertidos (a'-d'): (a,a') CDP 19, $N=2.297.900$; (b,b') CPD 29, $N=7.724.352$; (c,c') CPD 111, $N=1.169.000$; (d,d') CPD 211, $N=1.929.990$. As setas azuis apontam para riscamento da amostra.

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.6 do corpo principal do texto (item 5.2.1).

A2.2 Empresa X

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.2 *Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP19, N=2.297.900: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.9 do corpo principal do texto (item 5.2.2).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.3 *Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP29, N=7.724.352: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.10 do corpo principal do texto (item 5.2.2).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.4 *Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP111, $N=1.169.000$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.11 do corpo principal do texto (item 5.2.2).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.5 *Imagens radiográficas digitais (equipamento originalmente direcionado a aplicações odontológicas) obtidas para o CDP211, $N=1.929.990$: (a) Padrão; (b) Tom invertido correspondente; (c) Alto relevo (3-D); (d) Tom invertido correspondente ao 3-D.*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.12 do corpo principal do texto (item 5.2.2).

A2.3 Universidade Federal de Pernambuco

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.6 Continua na próxima página.

Figura A2.6 *Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP19, $N=2.297.900$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.13 do corpo principal do texto (item 5.2.3).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.7 Continua na próxima página.

Figura A2.7 Imagens radiográficas (equipamento industrial) obtidas para o CDP29, $N=7.724.352$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.14 do corpo principal do texto (item 5.2.3).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.8 Continua na próxima página (As setas azuis apontam para riscamento da amostra).

(e)

(f)

(g)

(h)

Figura A2.8 *Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP111, $N=1.169.000$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.15 do corpo principal do texto (item 5.2.3).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura A2.9 Continua na próxima página.

Figura A2.9 *Imagens radiográficas digitais (equipamento industrial) obtidas para o CDP211, $N=1.929.990$: (a) Padrão, para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (b) Tom invertido correspondente a $+45^\circ$; (c) Padrão, para um ângulo de incidência de -45° ; (d) Tom invertido correspondente a -45° ; (e) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de $+45^\circ$; (f) Tom invertido correspondente ao 3-D a $+45^\circ$; (g) Alto relevo (3-D) com filtro Emboss para um ângulo de incidência de -45° ; (h) Tom invertido correspondente ao 3-D a -45° .*

Este conjunto de imagens ampliadas corresponde àquele mostrado na Figura 5.16 do corpo principal do texto (item 5.2.3).